

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES
M. Ing.

ÉRIC TAILLON

ÉTALONNAGE DE CAMÉRAS NUMÉRIQUES

MONTREAL, LE 12 AOÛT 2002

© droits réservés de Eric Taillon

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

- M. Roland Maranzana, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée,
École de technologie supérieure
- M. Nicholas Krouglicof, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique,
Union College de Schenectady, New York
- M. Richard Macdonald, professeur
Département de génie de la production automatisée,
École de technologie supérieure
- M. Patrick Rousseau, M. Ing.
Walsh Automation, Montréal, Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET UN PUBLIC

LE 15 JUILLET 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉTALONNAGE DE CAMÉRAS NUMÉRIQUES

Eric Taillon

SOMMAIRE

L'utilisation de caméras en contrôle dimensionnel possède l'avantage indéniable d'être une approche sans contact. L'ensemble des déformations de l'image perçue par la caméra à partir de l'espace représente cependant un obstacle important. Ces déformations ne permettent pas d'obtenir une mesure de dimensions constante, même dans un environnement connu. Les déformations engendrées sur les images sont issues notamment de distorsions de lentilles et de manquement dans la coaxialité de positionnement des éléments de lentilles et de capteurs.

Ce projet présente une méthode d'étalonnage qui se propose de déterminer une série de paramètres intrinsèques et extrinsèques du système caméra-lentilles. Ces paramètres permettent ensuite l'application d'une correction des images perçues, de façon à éliminer les effets pervers des défauts de forme de lentilles et désalignements de montage des éléments du système.

ÉTALONNAGE DE CAMÉRAS NUMÉRIQUES

Eric Taillon

SOMMAIRE

L'utilisation de caméras en contrôle dimensionnel possède l'avantage indéniable d'être une approche sans contact. La vitesse de traitement numérique maintenant rendue disponible par des ordinateurs puissants permet d'appliquer un grand nombre d'opérations à une seule image, et ainsi de déterminer avec certitude les dimensions ou les caractéristiques de formes d'un objet que l'on désire valider. L'ensemble des déformations de l'image perçue par la caméra à partir de l'espace représente un obstacle important. Ces déformations ne permettent pas d'obtenir une mesure de dimensions constante, même dans un environnement connu. Les déformations engendrées sur les images sont issues notamment de distorsions de lentilles et de manquement dans la coaxialité de positionnement des éléments de lentilles et de capteurs.

Ce projet présente une méthode d'étalonnage qui constitue un compromis acceptable entre la performance et la difficulté d'application. La base de construction de la procédure est un choix judicieux des méthodes de modélisation des éléments constitutifs du système caméra-lentilles. Diverses méthodes de solution sont ensuite utilisées afin de déterminer une série de paramètres intrinsèques et extrinsèques du système de vision. Ces paramètres permettent ensuite l'application d'une correction des images perçues, de façon à éliminer les effets pervers des défauts de forme de lentilles et désalignements de montage des éléments du système.

Des essais ont été effectués sur différents systèmes caméra-lentilles, afin de déterminer de façon quantitative et qualitative la performance de la procédure. Les résultats démontrent une excellente performance, tant sur des systèmes empreints de fortes distorsions que sur des systèmes présentant un minimum de défauts.

DIGITAL CAMERA CALIBRATION

Eric Taillon

ABSTRACT

One of the most important advantages of computer vision applications in dimensional control resides in its non-contact nature. Modern computers allow large amounts of calculations to be performed on a single image, which allows for rapid extraction of shape characteristics and dimensions of a physical object.

The image projection from objects present in space to the camera sensor is affected by various distortion parameters. The deformation of the image will result in poor accuracy and an inconsistency of measurements using a camera and lenses system. The nature of these deformations lies in the misalignment of lens and camera elements, and in the inaccuracy of the spherical lens surface.

The objective of this project is to devise a camera calibration method that represents an acceptable compromise between performance and the amount of calculation necessary for its application. This objective is to be achieved by the careful modeling of the camera and lenses systems. The solution to this model will allow determination of extrinsic and intrinsic parameters of the system, therefore allowing image correction to be performed on new images. This correction will allow images to be taken without being adversely affected by distortion and displacement elements generated by lens shape and mounting errors.

Tests have been performed on different camera and lens systems, in order to determine the overall performance and accuracy of the method. The results have demonstrated an excellent performance for both models with high distortion levels as well as models with higher original accuracy.

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier mes codirecteurs, Roland Maranzana et Nicholas Krouglicof, pour le support matériel, financier et pédagogique fourni pendant la durée de mes travaux de recherche. Au cours de ces deux années, la multitude de projets et de domaines différents d'application dans lesquels je fus impliqué m'ont permis de grandement élargir mon champ de compétences, ainsi que de mieux orienter ma carrière en tant qu'ingénieur. L'orientation fortement axée sur l'application industrielle des théories et pratiques d'ingénierie et de recherche constitue un atout précieux qui m'a été inculqué par les pratiques du laboratoire LIPPS et de ses constituants.

Je tiens à remercier également mes collègues de travail au cours de ces années, Youri Juteau, Patrick Rousseau, Saed Ehsani, Omar Msaaf et Plamen Petrov, pour n'en nommer que quelques-uns.

Je remercie également Richard Tomsing et Patrice Dion, pour les innombrables interventions de support matériel et logiciel dont j'ai eu besoin lors de mes travaux.

TABLE DES MATIÈRES

	page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LA PROBLÉMATIQUE	4
1.1 Les bases du contrôle dimensionnel	4
1.2 Les caméras en contrôle dimensionnel	4
1.3 Caméras numériques et analogiques.....	4
1.4 Problèmes d'utilisation	5
1.5 Distorsions de lentilles.....	6
1.6 Incertitudes sur la précision	6
CHAPITRE 2 LES ÉLÉMENTS DE MODÉLISATION.....	8
2.1 Modélisation de la caméra	8
2.1.1 Modèle trou d'aiguille	8
2.1.2 Modèle linéaire	11
2.1.3 Modèle augmenté	12
2.1.4 Modèle hybride.....	13
2.1.4.1 Distorsion radiale non linéaire.....	14
2.1.4.2 Distorsion tangentielle non linéaire	15
2.1.4.3 Distorsion linéaire.....	17
2.2 Simplifications possibles des modèles	18

2.2.1	Simplification de la distorsion linéaire	18
2.3	Utilisation d'une cible d'étalonnage	19
2.3.1	Caractéristiques des cibles	19
2.3.1.1	Types de points de contrôle	19
2.3.1.2	Méthodes d'extraction des points de contrôle	20
2.3.1.2.1	Objets circulaires	20
2.3.1.2.2	Objets linéaires	21
2.3.1.3	Considérations mathématiques	23
2.3.2	Cibles 2D et 3D en application	25
2.3.2.1	Cible 2D	25
2.3.2.2	Cible 3D	26
CHAPITRE 3 LA SOLUTION UTILISÉE		28
3.1	Modélisation de type non linéaire augmenté	28
3.2	Cible 2D planaire à points linéaires	28
3.2.1	Choix des dimensions de cible	28
3.2.2	Extraction des points de contrôle	31
3.2.2.1	Cas de distorsion trop importante	32
3.3	Utilisation de la TLD en estimation initiale des paramètres	35
3.3.1	Nécessité d'approximation des paramètres	35
3.3.2	Construction du modèle de la TLD	37
3.3.3	Méthode de solution de la TLD	39
3.3.4	La TLD en application	42
3.4	Modèle non linéaire	42
3.4.1	Modèle de base linéaire	42
3.4.2	Augmentation du modèle avec distorsions non linéaires	42
3.4.3	Simplification des paramètres de distorsion linéaire	43
3.4.4	Construction de la fonction d'optimisation	44
3.4.5	Contraintes de la fonction d'optimisation	44
3.5	Distribution des erreurs de position de chaque pixel de l'image	45

3.6	Méthode de correction des images	45
CHAPITRE 4 EXEMPLES D'APPLICATION		47
4.1	Caméra à faible résolution et forte distorsion.....	47
4.1.1	Prise d'images.....	47
4.1.2	Extraction des points de contrôle.....	48
4.1.3	Estimation initiale des paramètres par la Transformation Linéaire Directe	52
4.1.4	Solution numérique.....	53
4.1.4.1	Analyse de la distribution de l'erreur de position des pixels.....	55
4.1.5	Seconde tentative de solution	56
4.1.5.1	Distribution de l'erreur	56
4.1.6	Analyse d'application des erreurs du modèle.....	59
4.1.7	Application de la correction	62
4.2	Caméra à moyenne résolution et faible distorsion.....	63
4.2.1	Prise d'images.....	63
4.2.2	Extraction des points de contrôle.....	64
4.2.3	Estimation initiale des paramètres par la Transformation Linéaire Directe	67
4.2.4	Solution numérique.....	68
4.2.4.1	Distribution de l'erreur	69
4.2.5	Analyse d'application des erreurs du modèle.....	72
DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS		75
CONCLUSION		83
ANNEXES		
1:	Guide d'application en programmation.....	84
BIBLIOGRAPHIE		101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Paramètres estimés de distorsion du modèle.	36
Tableau II	Paramètres estimés de centre d'application des distorsions radiales et tangentielles.	36
Tableau III	Résultats de l'estimation de paramètres par la TLD.	53
Tableau IV	Valeurs de départ des paramètres en solution numérique.	53
Tableau V	Valeurs finales des paramètres en solution numérique (premier essai) ..	54
Tableau VI	Valeurs finales des paramètres en solution numérique (second essai). ...	56
Tableau VII	Résultats de l'estimation de paramètres par la TLD.	68
Tableau VIII	Valeurs de départ des paramètres en solution numérique.	68
Tableau IX	Valeurs finales des paramètres en solution numérique.	69
Tableau X	Nombre d'opérations numériques requises par image, en extraction de points de contrôle	77
Tableau XI	Nombre d'opérations numériques requises en détermination des paramètres (par image).	77
Tableau XII	Nombre d'opérations numériques requises en correction d'images (par image).	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Modèle de base de projection en trou d'aiguille.	9
Figure 2	Illustration de l'application de distorsion radiale par courbes de niveau.	15
Figure 3	Illustration de l'application de la distorsion tangentielle.	16
Figure 4	Exemple de distorsion linéaire de capteur CCD.	17
Figure 5	Second exemple de distorsion linéaire de capteur CCD.	18
Figure 6	Point de contrôle circulaire simple.	20
Figure 7	Image réelle captée d'un point de contrôle circulaire.	21
Figure 8	Point de contrôle linéaire individuel.	22
Figure 9	Image réelle captée d'un point de contrôle linéaire.	22
Figure 10	Matrice d'application de l'opérateur Laplacien.	23
Figure 11	Point de contrôle avant l'application de l'opérateur Laplacien.	23
Figure 12	Point de contrôle après l'application de l'opérateur Laplacien.	24
Figure 13	Détail de la transition après l'application de l'opérateur Laplacien.	25
Figure 14	Correspondance entre l'intensité de transition et une courbe Gaussienne.	25
Figure 15	Image d'une cible 2D planaire.	26
Figure 16	Image d'une cible 3D (extrait de Heikkilä et Silvén).	27
Figure 17	Point de contrôle unique.	29
Figure 18	Cible composée de 14 x 14 points de contrôle.	30
Figure 19	Extremum de la grille de points de contrôle.	31
Figure 20	Boite de recherche des points de contrôle.	32
Figure 21	Mauvaise correspondance entre les points de contrôle et la grille de recherche.	34
Figure 22	Grille de recherche des points de contrôle soumis à un facteur de distorsion radiale de -0,3.	34
Figure 23	Système de référence de la TLD.	37
Figure 24	Exemple d'image perçue.	48
Figure 25	Sélection des zones limites.	49

Figure 26	Estimation des points de croisement à $k_1=0$	50
Figure 27	Estimation des points de croisement à $k_1 = -0,3$	51
Figure 28	Zones d'extraction des points de contrôle.....	52
Figure 29	Distribution de l'erreur de l'ensemble des points de contrôle pour toutes les images.	55
Figure 30	Distribution de l'erreur de position des points de contrôle du modèle (second essai).	57
Figure 31	Distribution statistique de l'erreur de position sur l'axe horizontal.....	58
Figure 32	Distribution statistique de l'erreur de position sur l'axe vertical.....	58
Figure 33	Distribution d'intensité de la distorsion radiale du modèle.	59
Figure 34	Distribution d'intensité de la distorsion tangentielle du modèle.....	60
Figure 35	Distribution d'intensité de la distorsion totale du modèle.	60
Figure 36	Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion radiale.....	61
Figure 37	Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion tangentielle.	61
Figure 38	Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion totale.....	61
Figure 39	Image originale empreinte de distorsion.	62
Figure 40	Image corrigée.....	62
Figure 41	Exemple d'image perçue.....	64
Figure 42	Sélection des zones limites.....	65
Figure 43	Estimation des points de croisement à $k_1=0$	65
Figure 44	Zones d'extraction des points de contrôle.....	67
Figure 45	Erreur de position des pixels selon le modèle utilisé.	70
Figure 46	Distribution de l'erreur de position des pixels selon l'axe horizontal.	71
Figure 47	Distribution de l'erreur de position des pixels selon l'axe vertical.....	71
Figure 48	Distribution d'intensité de la distorsion radiale du modèle.	72
Figure 49	Distribution d'intensité de la distorsion tangentielle du modèle.....	73
Figure 50	Distribution d'intensité de la distorsion complète du modèle.....	73
Figure 51	Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion radiale.....	74
Figure 52	Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion tangentielle.	74

Figure 53	3D de la distribution d'intensité de la distorsion complète.....	74
Figure 54	Construction du plan de points.....	91
Figure 55	Application de la translation	92
Figure 56	Application de la rotation.....	93
Figure 57	Projection de la cible virtuelle sur le capteur	94
Figure 58	Image virtuelle obtenue.....	95

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

CCD	Charge Coupled Device	(Dispositif à Transfert de Charge)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	(Semiconducteur Métal-Oxyde complémentaire)
JPEG	Joint Photograph Expert Group	(Norme de compression d'images)
NTSC	National Television Standards Committee	(Organisme National Américain de normes de Télédiffusion)
TLD	Transformation Linéaire Directe	

INTRODUCTION

Tout procédé de fabrication comporte des éléments d'incertitude. Ces éléments influent directement sur le procédé, et donc sur la qualité des produits qu'il génère. Afin de ne pas miner la capacité ultérieure d'apporter une valeur ajoutée à un produit en cours de fabrication, des étapes de contrôle sont insérées dans la chaîne de production. Ces contrôles s'appliquent à identifier les défauts présents dans la pièce qui rendent cette dernière inutilisable, ou qui la disqualifie du point de vue des normes appliquées au produit fini.

Le contrôle de la qualité ou de la validité d'une pièce comporte deux éléments de base, soit la structure et la dimension. La structure représente la présence, l'absence, la non-conformité ou la disfonctionnalité de caractéristiques de formes, tandis que les dimensions représentent le succès d'application du procédé de fabrication.

L'évaluation des éléments structurels d'une pièce peut être effectuée par un utilisateur, l'œil et le cerveau humain possédant la capacité de synthèse d'ensemble d'éléments d'une image. Il est possible pour cet inspecteur de déterminer, par exemple, la présence d'un trou au bon endroit sans avoir à y consacrer beaucoup d'attention. Le contrôle des dimensions est plus pénible, puisqu'il exige l'utilisation d'instruments de mesure, dont l'application est souvent sujette à des contraintes d'applications, tel la température, l'humidité, et la tolérance de ses éléments constitutifs.

Le contrôle complet d'une pièce est donc constitué d'une série d'opérations répétitives, qui seront sujettes à erreur, ou à une augmentation de la tolérance d'application. L'introduction d'un système de vision dans le contrôle dimensionnel apporte des éléments de solution intéressants aux problèmes reliés à ce domaine. En effet, la possibilité d'effectuer un nombre illimité d'opérations sur une même image permet

d'envisager non seulement une accélération du procédé, mais aussi une augmentation substantielle de sa vitesse d'application.

Puisque les caractéristiques de la pièce à inspecter sont connues, il est aisé de concevoir qu'un système de vision puisse permettre d'identifier la présence et la position de ses caractéristiques de forme, et ainsi de valider à la fois sa structure et ses dimensions.

La mise en application de l'inspection d'une pièce par la prise et l'évaluation d'images de celle-ci sont complexes, et requièrent la construction d'une procédure qui soit propre à chaque type d'inspection désiré. Cet aspect d'application n'est pas couvert par le présent document, puisqu'il constitue un détail spécifique à une application ultérieure de ce type de contrôle dimensionnel.

L'utilisation de matériel de prise d'image est essentielle dans l'application de cette méthode de contrôle. Ce matériel se définit comme l'interface entre la pièce présente dans un espace connu, et l'image numérique captée, qui sera utilisée dans la procédure de contrôle de structure et de dimensions. Ce matériel, comme toute chose, présente des défauts de fabrication.

Les défauts de fabrication des éléments constituant le système de vision s'appliquent tant à la caméra qu'au système de lentilles. Ces composants, empreints d'erreurs, vont alors introduire des erreurs dans la formation de l'image à partir du point de vue réel de l'objet. Ces erreurs minent évidemment la capacité d'application de la méthode de contrôle.

Afin de palier aux erreurs issues des défauts de fabrication du système caméra-lentilles, il est nécessaire de concevoir une méthode de correction des images perçues. Une méthode scientifique d'étalonnage est alors choisie, en fonction de sa performance et de sa simplicité d'application.

Nous discuterons tout d'abord au Chapitre 1 des éléments constituant de la problématique d'application de ces méthodes de contrôle, spécifiques au système caméra-lentilles. Le Chapitre 2 se propose d'effectuer un survol rapide des éléments de modélisation disponibles afin de construire un modèle mathématique cohérent du système caméra-lentilles.

Nous choisissons ensuite une méthode spécifique présentant les caractéristiques désirées au Chapitre 3, et détaillons sa méthode d'application. Cette méthode est ensuite appliquée à deux systèmes complets de caméra-lentilles, afin de valider sa performance, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Le Chapitre 4 présente un étalement des résultats de la procédure d'étalonnage sur les deux caméras utilisées.

Le Chapitre 5 se propose ensuite d'évaluer la performance et les détails d'application de la méthode choisie. On tente alors de faire le lien entre la procédure décrite et une utilisation ultérieure dans un environnement réel de production, avec toutes ses contraintes propres.

CHAPITRE 1

LA PROBLÉMATIQUE

1.1 Les bases du contrôle dimensionnel

Auparavant, l'inspection de dimensions ou de formes de pièces produites devait être effectué par du personnel qualifié, et ce, de façon manuelle. L'œil humain n'étant pas capable d'identifier des dimensions physiques, il est alors nécessaire d'utiliser des outils de mesure, ou des montages fixes permettant la validation de formes ou de dimensions des pièces.

1.2 Les caméras en contrôle dimensionnel

L'utilisation de la vision robotique permet, au contraire de l'œil humain, d'effectuer un nombre illimité de traitements à l'image perçue. Cette image peut non seulement être entreposée, mais on peut effectuer des traitements dont la nature porte sur plusieurs images en même temps.

Les algorithmes connus et répertoriés développés au cours des années permettent l'identification de plusieurs caractéristiques de forme, et même de se soustraire à la granularité de l'image numérisée.

1.3 Caméras numériques et analogiques

La caméra moderne est composée principalement de deux éléments constitutants. Le premier étant l'optique, ou l'ensemble de lentilles permettant une projection de l'image environnante sur une surface de lecture, le second étant le capteur de la caméra lui-même.

Les premiers capteurs optiques utilisent le principe de balayage afin de convertir la luminosité reçue en signal électrique, dont l'amplitude et la phase déterminent l'intensité et la couleur perçues à l'endroit balayé. Ce principe est plus simple d'application, mais possède des limites importantes. La conversion du signal de nature discrète en signal continu engendre nécessairement des pertes de précision importantes, et génère des interférences de proximité entre les éléments de lecture.

Les capteurs plus modernes, qu'ils soient de type CCD ou CMOS, utilisent plutôt un transfert d'information complètement numérique. L'information ainsi perçue par le capteur demeure intacte lors de son transfert, peu importe le nombre d'étapes de celui-ci. Ce type de capteur est de plus en plus courant, et il est mieux adapté à des utilisations industrielles de contrôle dimensionnel, puisque la précision y est de mise.

1.4 Problèmes d'utilisation

Mise à part les facteurs physiques, tels que le boîtier contenant les éléments optiques, le capteur et les circuits électroniques, une panoplie de problèmes d'utilisation apparaissent lorsque l'on tente de contrôler une dimension physique à l'aide d'une caméra.

L'utilisation de la lumière est critique, puisque la distribution de celle-ci est la base même du processus d'évaluation. Un objet métallique, par exemple, aura tendance à réfléchir la lumière de façon quasi-totale, tandis que des objets de couleur foncée possédant une surface matte auront tendance à tout absorber.

La sélection de la source de lumière et de son orientation sont critiques, et bien qu'ils influencent le développement ultérieur de l'application, ils ne constituent en rien une référence pour une application secondaire, malgré d'importantes similitudes.

Toute source d'erreur, telles que la dispersion lumineuse, la réflexion, la diffraction, les contrastes trop faibles ou trop forts constituent des sources d'erreur qui rendent

impossible l'application d'un contrôle précis sur les dimensions d'une image.

1.5 Distorsions de lentilles

Les éléments optiques modernes sont produits dans des gammes très vastes et des qualités très différentes. Il est possible de trouver facilement des jeux de lentilles de qualité exceptionnelle, ou encore médiocre. Malgré un contrôle de qualité très performant et une grande précision, toute lentille ou élément optique comporte naturellement des défauts de forme ou de montage.

Une lentille simple possède quatre caractéristiques de base importantes dans son application.

- Distance focale
- Courbure de surface primaire
- Courbure de surface secondaire
- Axe principal de montage

Lors de son installation dans un ensemble de lentilles communément appelé « objectif », des erreurs se produiront sur son alignement, s'ajoutant aux défauts de courbure qu'elle possède déjà. Ces défauts engendreront des déformations de l'image perçue par le capteur. Certaines zones se verront comprimées, d'autres étirées, ou simplement déplacées. La combinaison des courbures primaires et secondaires engendre nécessairement la distance focale. Cette dernière est donc assujettie aux erreurs de forme des deux surfaces.

1.6 Incertitudes sur la précision

Bien que l'image perçue par une caméra puisse sembler précise à première vue, elle comporte de façon évidente une panoplie de déformations la rendant inutile dans le

contrôle de dimensions physiques, sans au préalable lui avoir appliqué une correction appropriée. On peut imaginer, par exemple, l'utilisation d'une pièce de référence dont on connaît les dimensions afin de se doter d'une mesure étalon. Cette même pièce, lorsque présentée sous un angle différent, n'aura pas la même dimension sur l'image.

Le présent projet se propose de trouver une méthode représentant un compromis acceptable entre la difficulté d'utilisation et la précision obtenue dans la correction des images perçues par une caméra numérique utilisée à des fins de contrôle dimensionnel.

CHAPITRE 2

LES ÉLÉMENTS DE MODÉLISATION

2.1 Modélisation de la caméra

Afin de permettre l'application de méthodes scientifiques, il est nécessaire de permettre l'utilisation de solutions mathématiques à des problèmes de nature physique. La relation entre ces deux domaines distincts passe par la modélisation.

La formation d'une image planeaire n'est possible que si l'on est capable de sélectionner les rayons lumineux en fonction de leur provenance et de leur direction. La conversion de la lumière réfléchie par des objets présents dans l'espace en une image planeaire peut s'effectuer de deux façons principales :

- L'utilisation d'un point de sélection des ondes lumineuses reçues.
- La discrimination des rayons lumineux par l'utilisation d'une lentille.

Bien que l'on connaisse depuis longtemps les modèles représentant le comportement des lentilles minces ou épaisses, celui-ci est pratiquement impossible à prévoir lorsque les lentilles sont affectées de défauts de forme ou de coaxialité. La complexité trop grande d'un modèle mathématique symbolique comportant tous les éléments caractérisant le groupe de lentilles nous force à utiliser des modèles simplifiés.

2.1.1 Modèle trou d'aiguille

Ce modèle possède l'avantage très important d'être simple du point de vue mathématique. Il n'y a en effet aucun facteur de déviation des rayons lumineux qui soit tenu en compte. On néglige aussi les effets de diffraction possibles.

Une surface opaque placée devant le capteur de la caméra dans laquelle un trou de dimension quasi-nulle est percé aura pour effet de sélectionner en tout point de l'image perçue les rayons lumineux issus d'un point unique de l'espace.

Cette méthode d'application permet de modéliser le jeu de lentilles par une série de transformations tridimensionnelles. Ces transformations individuelles sont alors aisément appliquées par des matrices. Il est alors possible de modéliser l'ensemble de la transformation par l'algèbre matriciel correspondant.

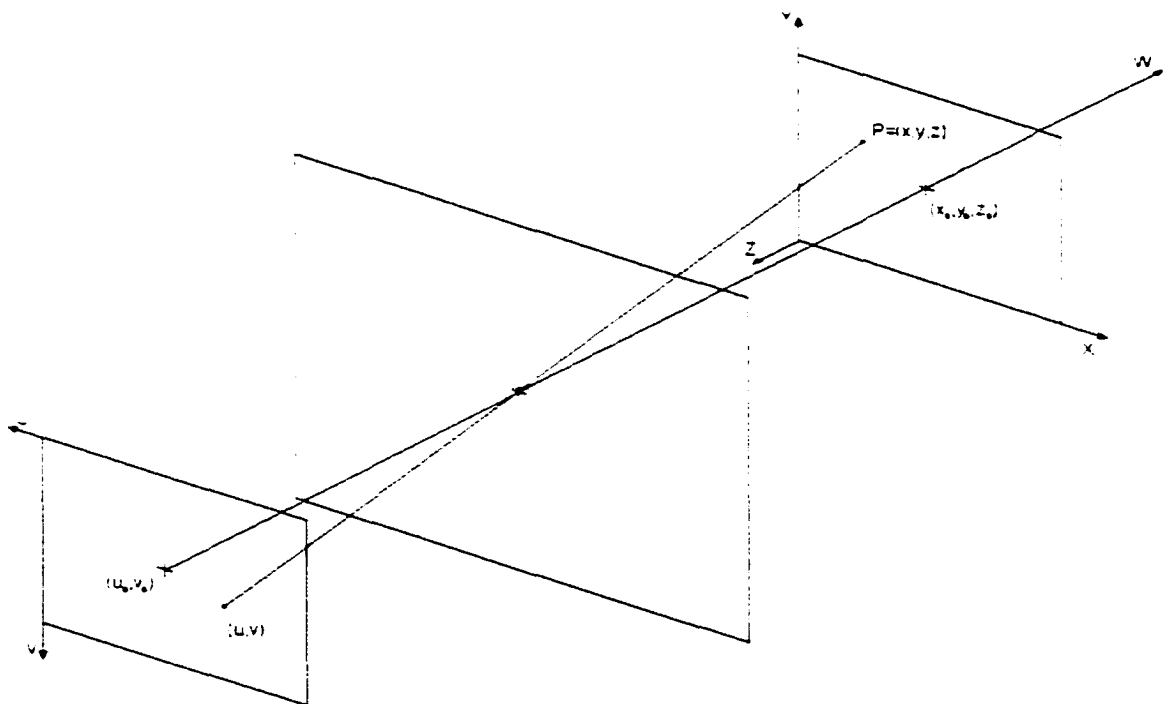


Figure 1 Modèle de base de projection en trou d'aiguille.

L'interprétation des transformations linéaires appliquées à un point de l'espace sont aisément modélisée par des matrices de transformation R et T , caractérisant respectivement une rotation autour des axes principaux et une translation rapportant le

point vers la caméra. La rotation R est appliquée avec les angles d'Euler, soit $(\omega, \varphi, \kappa)$. On peut donc déduire la position d'un point (x_i, y_i, z_i) à partir d'un point de l'espace (X_i, Y_i, Z_i) , en rapportant ce point dans le référentiel de caméra, centré à (x_0, y_0, z_0) . La transformation de base sera alors :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

tel que :

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa \\ m_{12} &= \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa - \cos \omega \sin \kappa \\ m_{13} &= \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ m_{21} &= \cos \varphi \sin \kappa \\ m_{32} &= \sin \omega \cos \varphi \\ m_{31} &= -\sin \varphi \\ m_{22} &= \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \\ m_{23} &= \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ m_{33} &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned}$$

On projette ensuite le point (x_i, y_i, z_i) sur une surface planaire représentant le capteur de la caméra pour créer le point (u_i, v_i) :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \frac{1}{z_i} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ce modèle simple permet de projeter un point de l'espace dans le référentiel de la caméra, et ainsi de trouver un point unique d'image pour chaque point de cet espace. Il est par contre dénué de paramètres modélisant une difformité ou facteur d'échelle normalement présent dans une caméra.

2.1.2 Modèle linéaire

Ce modèle est similaire au trou d'aiguille, puisqu'il est basé sur une série de transformations linéaires simples. Il diffère par contre du simple trou d'aiguille par l'introduction de la notion de distance focale. On ajoute donc au trou d'aiguille la capacité de concentrer ou diluer le flux lumineux sur l'ensemble de l'image. Cette distance focale artificielle est empruntée à la réelle lentille de verre ou de plastique.

On utilise donc le même modèle mathématique de projection que pour le trou d'aiguille, mais on y introduit la notion de distance focale. On projette les points (x_i, y_i, z_i) sur une surface plane, en tenant compte du paramètre f de distance focale. Cette projection permet d'obtenir des points en coordonnées bidimensionnelles $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \frac{f}{z_i} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Afin d'intégrer les notions de distance focale et de centre d'application relatif à la lentille, Heikkilä et Silvén [1] introduisent les coefficients de transformation D_u et D_v . Ces derniers permettent la transformation des coordonnées métriques en pixels, et on y attache ainsi le facteur d'échelle s_u , qui permet la différenciation entre les dimensions des deux axes :

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u \tilde{u}_i \\ D_v \tilde{v}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Afin de simplifier la présentation du modèle, Bouguet [2] présente la même transformation en utilisant directement une distance focale exprimée en pixels plutôt qu'en dimensions métriques. Cette méthode possède la particularité de générer des distances focales différentes pour les deux axes principaux. Le facteur d'échelle s_u utilisé en (2.4) est alors appliqué à l'ensemble du modèle mathématique. Le ratio (f_x/f_y) représente alors le facteur d'échelle global du modèle, issu des particularités des lentilles et de l'aspect rectangulaire des éléments photosensibles du capteur. On obtient ainsi la transformation :

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \frac{x_i}{z_i} \\ f_y \frac{y_i}{z_i} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.1.3 Modèle augmenté

Le modèle linéaire de base fonctionne dans le cas d'une projection simple, où le système de lentille est constitué d'un trou d'aiguille. Cette modélisation néglige complètement les éléments de distorsion, et ne représente en soi qu'une base d'application. Dans le but de rapprocher le modèle mathématique de la réalité, on choisit d'augmenter le modèle par l'ajout de paramètres de distorsion. Ces paramètres affectent la position individuelle de chacun des pixels, et la contribution individuelle de chacune sera ajouté à la position du pixel :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta u_i \\ \delta v_i \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La modélisation d'une distorsion peut être effectuée de façon linéaire ou non linéaire. Dans le cas de modèles de caméra entièrement linéaires, tels qu'utilisés par Melen [3], il est impossible d'ajouter des éléments non linéaires au modèle, sans en rendre la solution

matricielle impossible. On choisit donc de modéliser la distorsion par une matrice de transformation qui s'ajoute au processus de projection :

$$B = \begin{bmatrix} 1+b_1 & b_2 & 0 \\ b_2 & 1-b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Combiné avec l'expression de distance focale :

$$F = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

On aura donc :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = MBF \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

LA modélisation linéaire de base ne possède pas de paramètres de modélisation des diverses distorsions. Plusieurs chercheurs [4][5][6][7] ayant modélisés les systèmes linéaires ont étudiés les modèles de distorsion [8], mais leur intégration au modèle de base force alors une méthode de solution numérique plutôt que symbolique. L'étalonnage au sens linéaire néglige donc ces distorsions afin de conserver son intégrité de solution.

2.1.4 Modèle hybride

Cette méthode d'augmentation d'un modèle de base ne s'arrête pas à la modélisation linéaire. En effet, si l'on admet que l'utilisation d'un modèle non linéaire est acceptable, il est possible de combiner les deux types d'éléments. Le modèle de base linéaire,

construit à partir du trou d'aiguille déjà augmenté, se verra assorti de paramètres de distorsion non linéaires, représentant mieux la réalité des déformations optiques de lentilles. Les éléments de modélisation seront en effet basés sur des équations symboliques représentant les diverses déviations affectant les rayons lumineux. L'utilisation d'une série d'équations symboliques appliquées sur un plan unique à chaque lentille utilisée complexifie le modèle résultant. La découverte d'une solution symbolique, lorsque l'on utilise un grand nombre d'inconnues, est considérée trop complexe pour le but du présent exercice.

Plusieurs chercheurs ont tenté de déterminer des façons simples mais efficaces de modéliser les déformations issues des défauts de ces éléments. De façon générale, trois modèles de distorsion se démarquent par leur facilité d'application et leur bonne performance.

2.1.4.1 Distorsion radiale non linéaire

Issue des défauts de courbure d'une ou de plusieurs lentilles, cette distorsion est la plus évidente à constater. L'image perçue est en effet déformée de façon radiale, à partir d'un point d'application, habituellement localisé près du centre de l'image. L'effet « œil de poisson » constitue une excellente analogie pour faciliter l'interprétation de ce type de distorsion.

Afin de modéliser cette distorsion, deux facteurs importants sont pris en ligne de compte. D'une part, le centre d'application, qui ne se trouve pas nécessairement au centre de l'image, puis un polynôme appliqué en deux dimensions qui modélisera le déplacement des pixels vers le centre ou vers la périphérie de l'image.

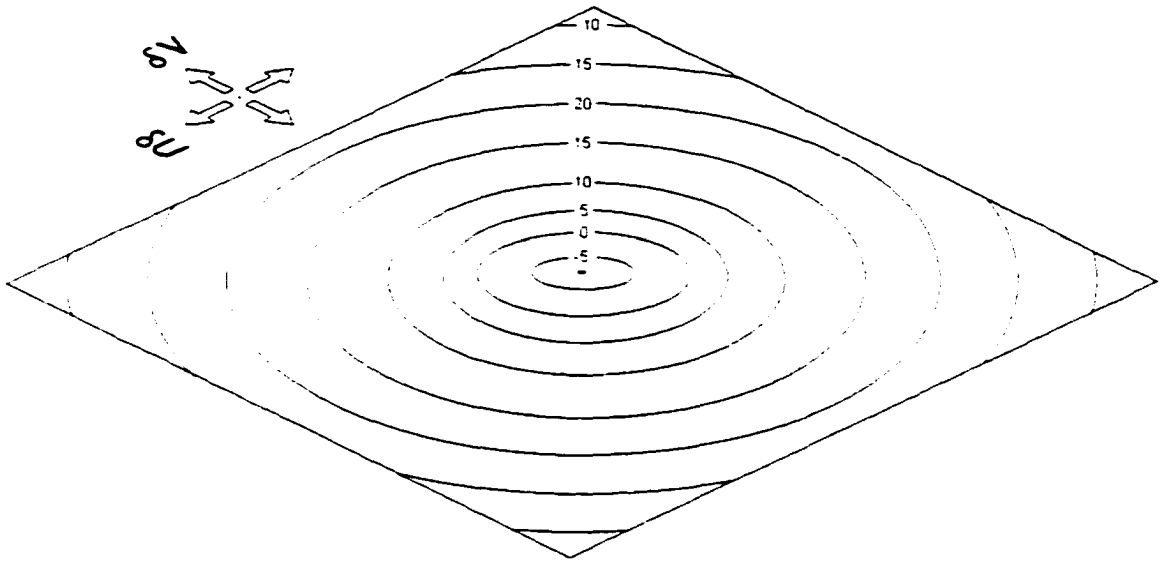


Figure 2 Illustration de l'application de distorsion radiale par courbes de niveau.

Soit le centre d'application (u_0, v_0) , et la position d'un point de l'image (\tilde{u}, \tilde{v}) , on peut utiliser une approximation de la distorsion radiale par la formule suivante [1] :

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(r)} \\ \delta v_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) \\ \tilde{v} (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Où $r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2}$, et $[k_1, k_2, k_3, \dots, k_n]$ sont les paramètres de distorsion radiale du modèle.

2.1.4.2 Distorsion tangentielle non linéaire

Ce modèle de distorsion tient compte des défauts d'alignement des axes de lentilles. Que ce soit dans le cas d'une lentille simple ou un ensemble de lentilles, les déformations engendrées par un mauvais alignement de ces dernières prendra la forme d'un décentrage, ou de déformations hétéroclites.

Un modèle mathématique de ce type de distorsion qui soit efficace comporte deux éléments de base de sa modélisation. Tout d'abord un centre d'application, similaire à la distorsion radiale, doit être utilisé. Puis un facteur de déplacement vertical et horizontal, relatif à la position du point en rapport au centre d'application.

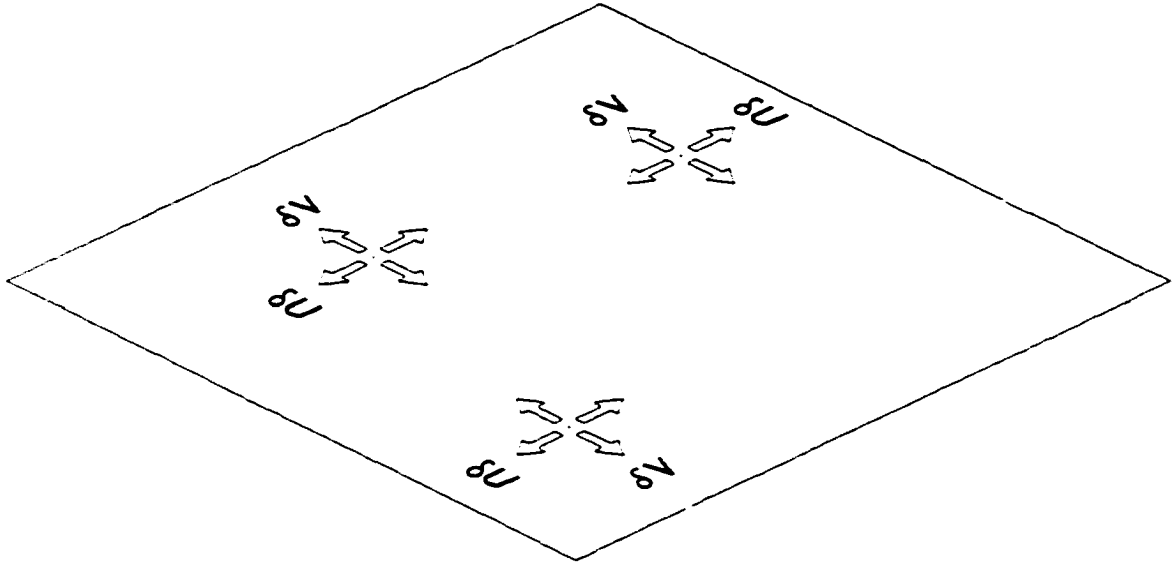


Figure 3 Illustration de l'application de la distorsion tangentielle.

Soit le centre d'application (u_0, v_0) , et la position d'un point de l'image (\tilde{u}, \tilde{v}) , on peut effectuer une approximation de ce type de distorsion par le modèle suivant [1] :

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(n)} \\ \delta v_i^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2k_4 \tilde{u}_i \tilde{v}_i + k_5 (r_i^2 + 2\tilde{u}_i^2) \\ k_4 (r_i^2 + 2\tilde{v}_i^2) + 2k_5 \tilde{u}_i \tilde{v}_i \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Où $r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2}$, et $[k_4, k_5]$ sont les paramètres de distorsion tangentielle du modèle.

2.1.4.3 Distorsion linéaire

Ce type de distorsion tient compte des déplacements des objets d'émission ou de perception optique. Ces déplacements sont caractérisés par une erreur d'orthogonalité par exemple, ou bien une erreur dans le balayage d'une image issue d'une caméra qui n'est pas complètement numérique. Elle se manifeste soit dans la représentation trapézoïdale des pixels de l'image, ou par une erreur de balayage, souvent issue de la non linéarité des transistors de synchronisation du balayage de l'image.

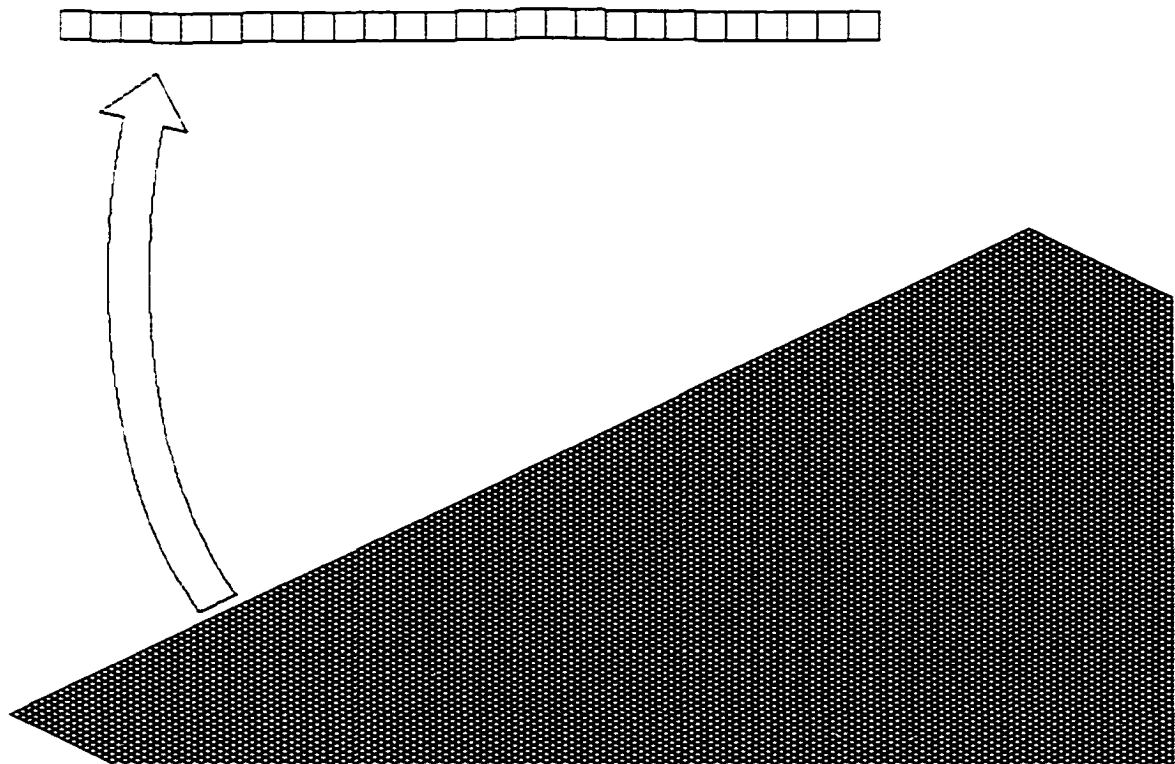


Figure 4 Exemple de distorsion linéaire de capteur CCD.

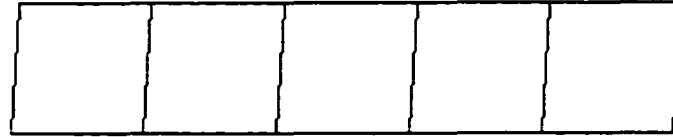


Figure 5 Second exemple de distorsion linéaire de capteur CCD.

Représenté par une matrice de transformation simple, cet élément de distorsion possède une influence négligeable [1] [4], qui se confond bien avec les paramètres de distorsion tangentielle. À noter que ce type de distorsion peut être utilisé avantageusement dans des cas de prise d'image en mouvement, afin de compenser les effets pervers du balayage de l'image.

La distorsion linéaire ne nécessite pas un polynôme pour son application. La déformation engendrée par ce modèle est de premier ordre, et peut être modélisée à l'aide de deux coefficients (b_1, b_2) utilisés dans une matrice de transformation simple [4]:

$$B = \begin{bmatrix} 1+b_1 & b_2 & 0 \\ b_2 & 1-b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.2 Simplifications possibles des modèles

2.2.1 Simplification de la distorsion linéaire

Bien que la majorité des chercheurs se soient concentrés sur la modélisation linéaire, l'ajout de paramètres de distorsion linéaire telle qu'exprimée en (2.12) n'apporte qu'une correction aux manquements d'orthogonalité de la cible ou du capteur de la caméra [1]. De par sa nature, il est en effet impossible qu'une lentille sphérique engendre une erreur

de linéarité. Dans plusieurs cas [1] [2], on choisit de la négliger, puisque le modèle augmenté non linéaire possède des éléments de modélisation de distorsion plus puissants et mieux représentatifs de la réalité.

2.3 Utilisation d'une cible d'étalonnage

Afin de déterminer l'altération engendrée sur l'image par le système de lentilles, une corrélation doit être trouvée entre le monde extérieur et l'image captée par la caméra. L'objectif étant l'évaluation de dimensions relatives aux positions de points sur l'image, l'objet présent dans l'espace doit avoir des dimensions connues.

Puisqu'il est difficile d'évaluer les dimensions reliant des objets complexes, une cible devra être fabriquée. Cette dernière devra permettre l'extraction de dimensions. Une grille ou matrice de points est appropriée et simple à fabriquer. Étant parfaitement orthogonale, elle permet l'obtention de précisions de calcul intéressantes.

2.3.1 Caractéristiques des cibles

2.3.1.1 Types de points de contrôle

Une grille de contrôle représente un ensemble de points dont les coordonnées sont de nature ponctuelle. Advenant qu'un objet de faibles dimensions soit présenté à une caméra, il sera alors difficile d'en déterminer les coordonnées. En effet, plus un objet est petit, plus la discrétisation fera perdre de la précision dans la détermination de la position de son image sur le capteur de la caméra.

Des méthodes d'interpolation sont connues depuis longtemps et permettent de déterminer la position exacte d'une transition de couleur ou de ton dans une image. Ces méthodes permettent alors l'utilisation de points de contrôle plus grands, tel l'intersection de segments linéaires, ou encore de zones circulaires. On peut ensuite évaluer le centre

exact d'une zone ou le point exact d'intersection de deux éléments linéaires avec une précision respectable.

2.3.1.2 Méthodes d'extraction des points de contrôle

2.3.1.2.1 Objets circulaires

Dans le cas d'objets de contrôle de type circulaires, on doit trouver le centre des cercles présentés à la caméra. L'utilisation d'interpolation linéaire appliquée localement et de la méthode des moindres carrés permet de déterminer les coordonnées exactes du centre de l'objet circulaire. La précision de la procédure étant directement reliée au nombre de points utilisés dans la détermination de la position de leur centre mutuel, les objets de contrôle ont avantage à posséder une grande taille.

Par contre, la cible d'étalonnage et le capteur de la caméra possédant tous les deux une taille fixe, le nombre de points de contrôle sera inversement proportionnel à leur taille. La diminution du nombre de points de contrôle altérant lui aussi de façon négative la précision de toute procédure d'étalonnage, un compromis devra être trouvé entre la population de points de contrôle et leur précision individuelle.

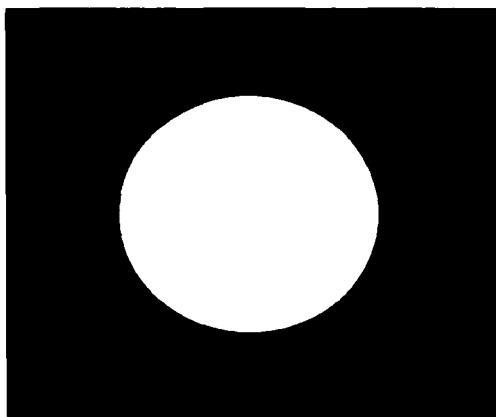


Figure 6 Point de contrôle circulaire simple.

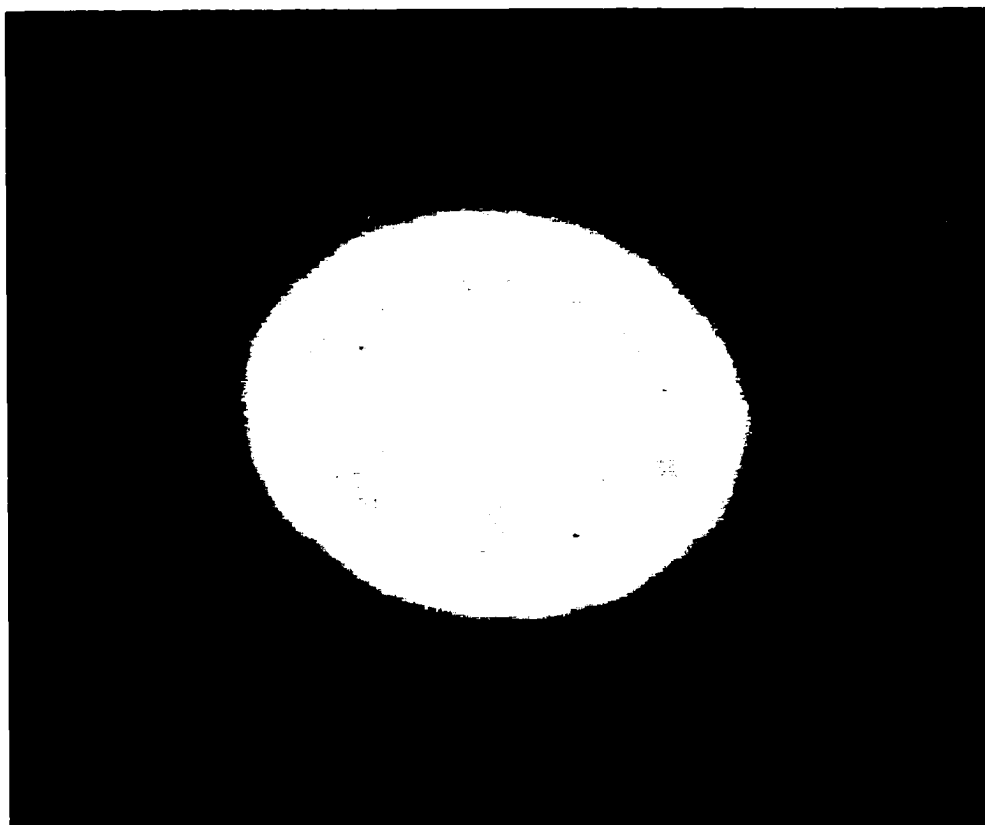


Figure 7 Image réelle captée d'un point de contrôle circulaire.

2.3.1.2.2 Objets linéaires

Puisqu'il est aisé de déterminer la position d'un point de transition entre deux zones de couleur ou d'intensité différente, il est alors facile de créer l'équation d'une ligne satisfaisant la règle des moindres carrés qui délimite la transition entre deux zones, advenant que celle-ci soit en effet linéaire dans l'espace.

Cette méthode permet alors de déterminer une équation caractérisant deux objets linéaires distincts, et ainsi de déterminer avec précision leur point de croisement. En résulte les coordonnées précises d'un objet ponctuel.

Cette méthode bénéficie de l'excellente performance de l'interpolation non linéaire, même si la ligne de transition de l'image n'est pas très bien définie ou est floue.

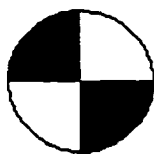


Figure 8 Point de contrôle linéaire individuel.



Figure 9 Image réelle captée d'un point de contrôle linéaire.

2.3.1.3 Considérations mathématiques

Afin de déterminer le point de transition exact entre deux zones, une série d'opérations devra être effectuée sur l'image. On doit d'abord se soustraire aux tons de gris correspondant aux différentes couleurs des surfaces observées, et extraire l'information de transition entre les objets présents dans l'image. Pour ce faire, un opérateur de dérivation est utilisé. L'opérateur Laplacien [9] donne d'excellents résultats :

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Figure 10 Matrice d'application de l'opérateur Laplacien.

Cet opérateur est appliqué sur l'ensemble des pixels de l'image.

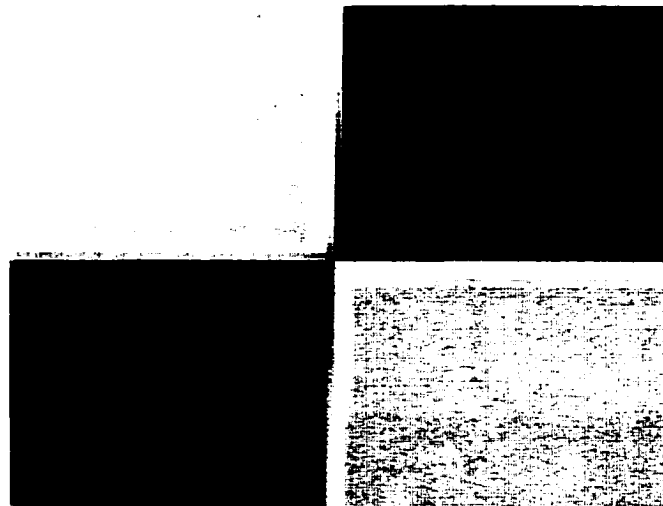


Figure 11 Point de contrôle avant l'application de l'opérateur Laplacien.

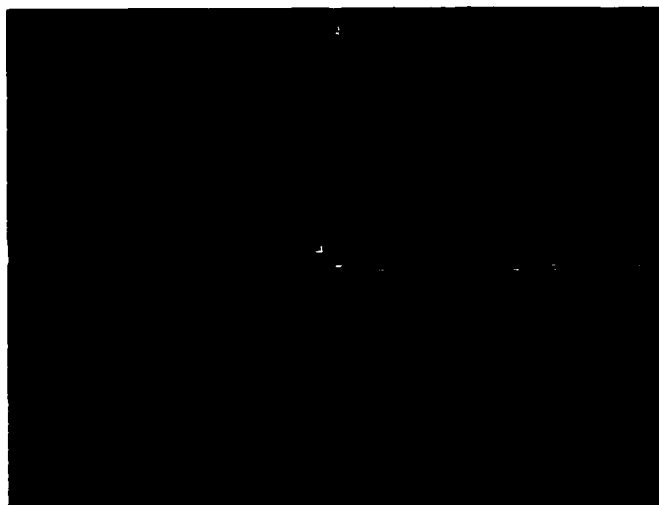


Figure 12 Point de contrôle après l'application de l'opérateur Laplacien.

Une transition de tons ou de couleur correctement établie constitue une séparation linéaire entre deux zones. Lors de la prise d'image, cette clarté fera place à une transition floue, puisque sujette à un mauvais réglage focal, des bruits électriques ou des éléments de diffraction. La transition de tons aura alors un aspect flou, dont la nature de la distribution, bien connue, est Gaussienne [10].

Lors de l'extraction de l'information caractérisant cette transition, on utilise donc le modèle Gaussien afin de déterminer la présence exacte du point de contact entre les deux zones d'intérêt [11].



Figure 13 Détail de la transition après l'application de l'opérateur Laplacien.

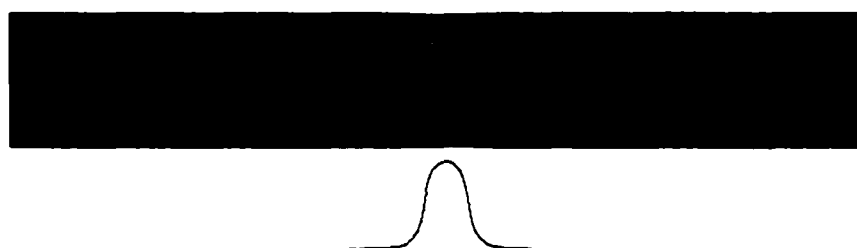


Figure 14 Correspondance entre l'intensité de transition et une courbe Gaussienne.

2.3.2 Cibles 2D et 3D en application

2.3.2.1 Cible 2D

Une cible planaire est facile à produire. Cette dernière donne à la caméra une grille d'éléments de contrôle orthogonaux, permettant l'extraction des coordonnées des points exacts. Un certain nombre de points de contrôle permet alors de construire une relation

entre l'espace et le capteur de la caméra qui donnera une précision acceptable à la solution.

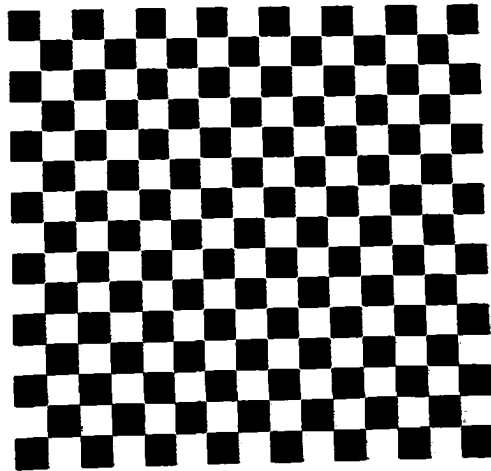


Figure 15 Image d'une cible 2D planaire.

2.3.2.2 Cible 3D

Une cible tridimensionnelle représente une évolution de la cible 2D. Le fait de présenter plusieurs faces d'une cible comportant des grilles de points à la caméra en même temps est équivalent à l'utilisation de plusieurs images consécutives en 2D, donnant à la caméra les mêmes points de vue. L'utilisation d'une cible 3D n'est donc pas nécessaire, puisque la même information peut être extraite d'une série d'images prises d'une cible 2D. Heikkilä et Silvén [1] mentionnent que l'aspect oblique du plan de vue induit une erreur de lecture des points de contrôle circulaires. En effet, plus cette cible 3D sera tournée pour faire face à la caméra, plus les deux autres faces seront cachées. Dans cette éventualité, les points de contrôle deviennent difficiles, voir impossibles à lire avec précision.

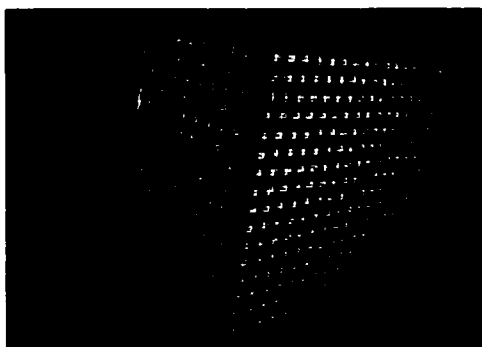


Figure 16 Image d'une cible 3D (extrait de Heikkilä et Silvén).

CHAPITRE 3

LA SOLUTION UTILISÉE

3.1 Modélisation de type non linéaire augmenté

Le modèle choisi afin de déterminer les paramètres intrinsèques du système est le trou d'aiguille, augmenté d'une distance focale et d'un facteur d'échelle, puis de modèles de distorsions radiales et tangentielles non linéaires. On choisit de négliger la distorsion linéaire, et on assume l'application des distorsions radiales et tangentielles en un même point principal de l'image. Cette approche augmentée permet d'obtenir des performances satisfaisantes sans pour autant obtenir un modèle d'une complexité déraisonnable.

3.2 Cible 2D planaire à points linéaires

3.2.1 Choix des dimensions de cible

Dans un premier temps, la cible d'étalonnage se doit de posséder une orthogonalité irréprochable, ainsi que des dimensions les plus précises possibles. La qualité d'impression de l'imprimante utilisée, soit une imprimante de marque Hewlett Packard, modèle LaserJet 2200, certifie une précision de placement de chacun des points équivalente à la résolution d'impression nominale, soit de 1200 points par pouce [14]. Compte tenu des difficultés autrement engendrées par l'utilisation d'une méthode plus précise qui reste à déterminer, cette précision était jugée acceptable pour ce projet.

L'élaboration du motif de la cible est issu d'une extrapolation des caractéristiques des points de contrôle choisis. En effet, lors de l'évaluation de la position d'un point, on utilise une cible simple représentant un point de croisement de deux lignes, issues de la transition entre deux zones de contraste différent.

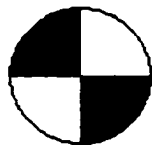


Figure 17 Point de contrôle unique.

Afin de permettre la lecture de plusieurs points de contrôle similaires, ces derniers doivent être placés à une distance précise et constante les uns des autres, afin de former une grille. Cette disposition équidistante ressemble alors à un échiquier, puisque chacun des points de contrôle touche ses voisins.

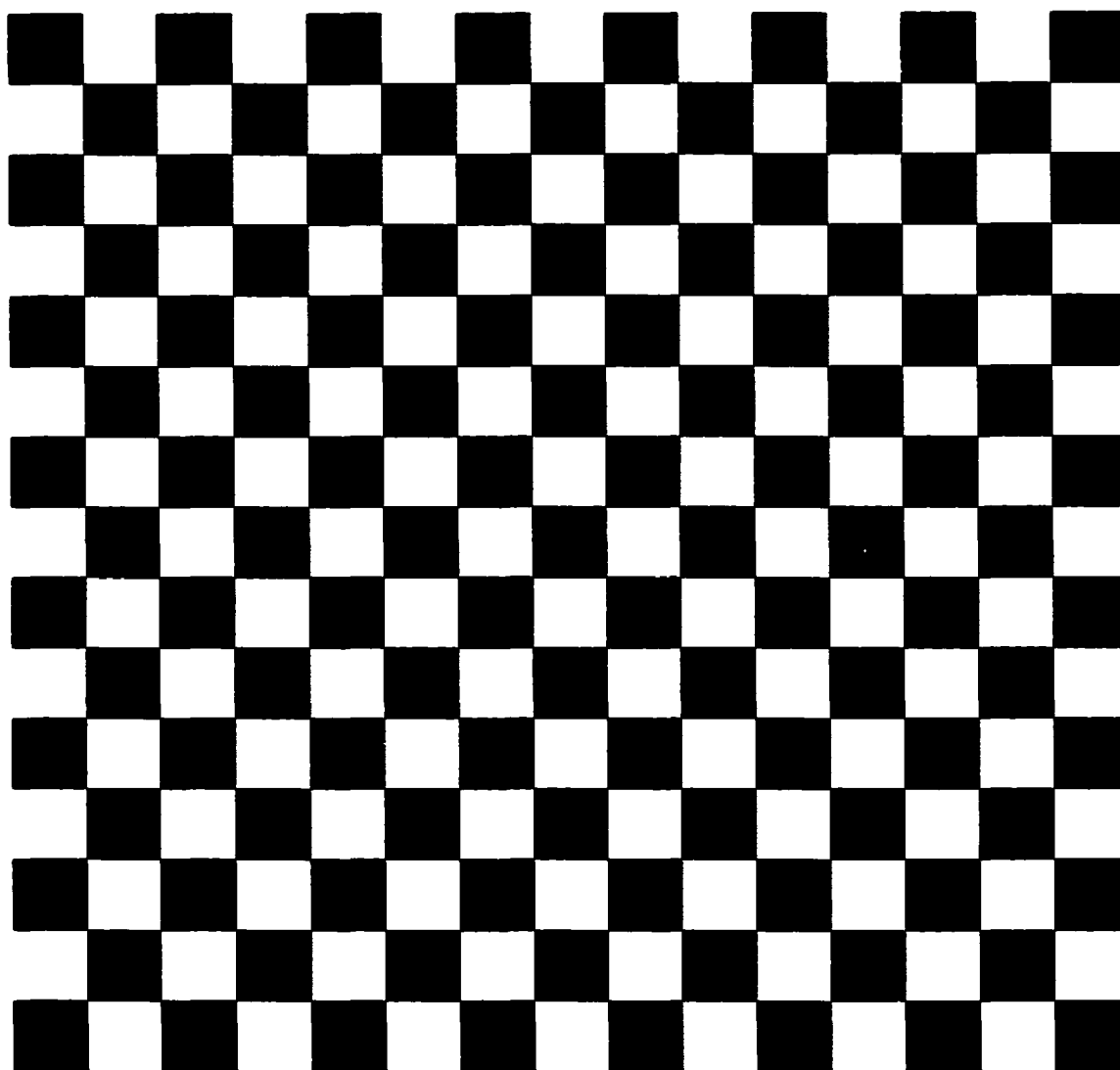


Figure 18 Cible composée de 14 x 14 points de contrôle.

Cette cible est ensuite imprimée à une échelle lui permettant d'être entièrement contenue sur une seule page de format A4. On contrôle ensuite la dimension extérieure de la grille afin de connaître la distance séparant chacun des points de contrôle. Cette distance permettra ensuite de connaître la distance séparant la cible de la caméra, et ainsi de déterminer la distance focale et le facteur d'échelle.

3.2.2 Extraction des points de contrôle

Puisque la cible est présentée à la caméra de façon aléatoire, sa position et son orientation sont au préalable inconnus. Il sera alors difficile de déterminer la position des extremums de la grille, ou de ne pas confondre ses éléments constitutants avec le décor.

Afin d'éviter ces problèmes, il est possible d'intervenir manuellement avant de lancer un algorithme de recherche automatique. On peut ainsi identifier les points extrêmes de la cible à ses quatre coins. L'algorithme de recherche des points de contrôle est alors simplifié, puisqu'il est possible d'utiliser une interpolation simple permettant la recherche locale des points de contrôle.

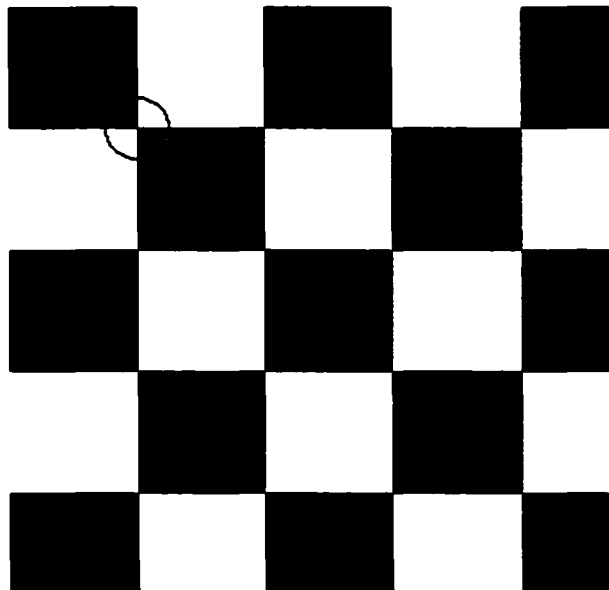


Figure 19 Extremum de la grille de points de contrôle.

On utilise ensuite l'interpolation linéaire, assortie de l'information du nombre de points de contrôle présents sur la cible. On peut ensuite diviser l'intervalle de chacun des cotés de la boîte ainsi formée par le nombre de points recherchés, ce qui facilite la détermination de la position de chacun.

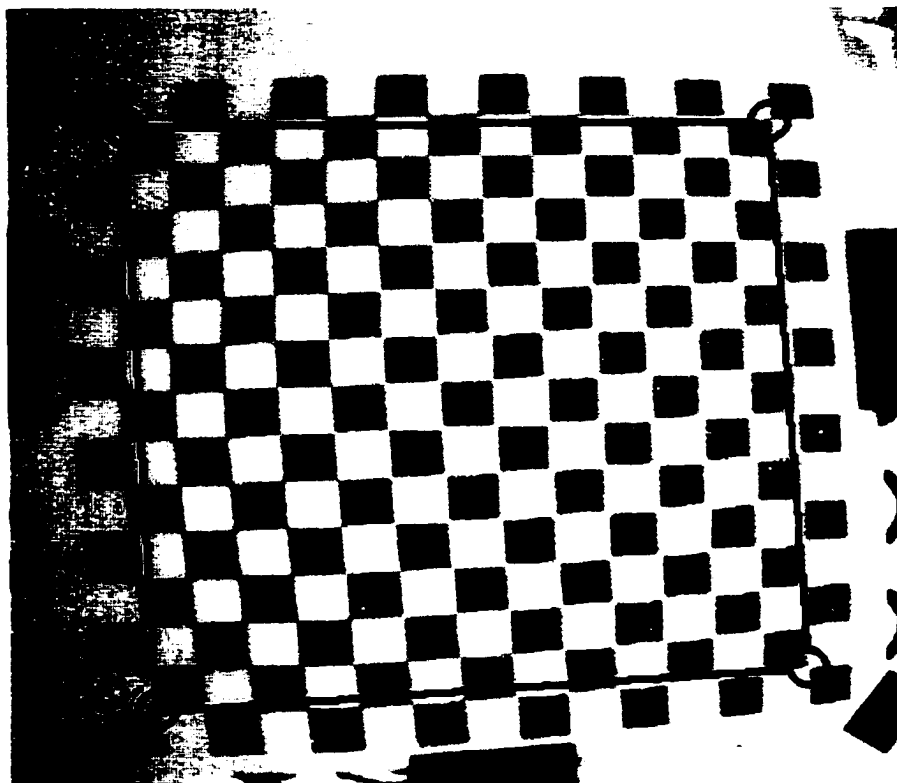


Figure 20 Boite de recherche des points de contrôle.

On divise les intervalles de recherche horizontaux et verticaux afin de générer une grille de points équidistants, qui devraient en principe représenter la position approximative des points de contrôle. Cette grille permet ensuite la recherche automatique de ces points.

3.2.2.1 Cas de distorsion trop importante

Advenant que la distorsion radiale soit trop importante, il est possible que la trajectoire des points de contrôle ne corresponde pas avec la ligne droite reliant les extremums. Dans un tel cas, il est possible qu'un algorithme automatique échoue dans la tentative de

localiser les points. On peut alors estimer la distorsion radiale et ainsi affecter la position de recherche des points de contrôle.

On applique une distorsion radiale simple, dont le point d'application est le centre de l'image, et qui altère l'ensemble de la grille de recherche. Cette distorsion estimée n'affecte en rien le paramètre de distorsion radiale qui sera ultérieurement déterminé pour le système caméra-lentilles. Il ne sert qu'à assurer l'exactitude des coordonnées des points de contrôle.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (1 + r^2 k_1) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

tel que $r^2 = (x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2$

La nouvelle position des points d'évaluation (x, y) est déterminé par l'application de la distorsion radiale de second ordre k_1 . Les positions initiales (x_i, y_i) seront alors affectées en fonction de leur position relative au centre d'application (x_0, y_0) .

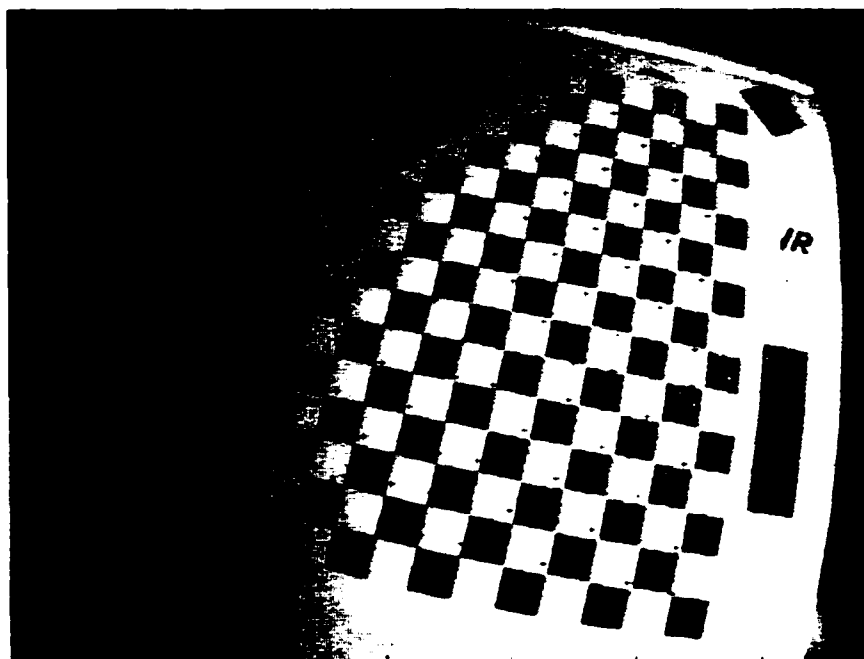


Figure 21 Mauvaise correspondance entre les points de contrôle et la grille de recherche.

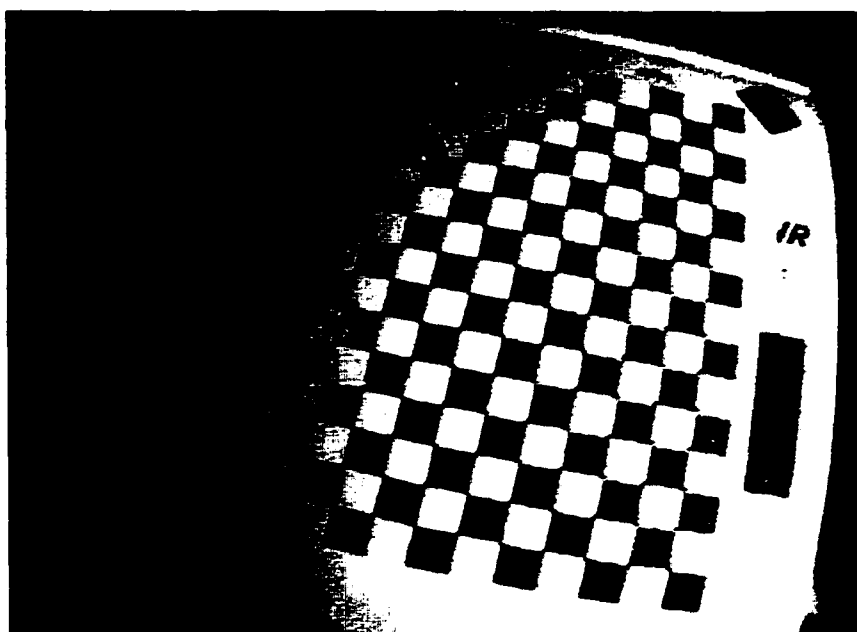


Figure 22 Grille de recherche des points de contrôle soumis à un facteur de distorsion radiale de -0,3.

Puisque l'on ne connaît pas la position des points au préalable, la détermination du coefficient de distorsion radiale primaire demeure un procédé d'essais erreurs. Il est cependant moins laborieux de procéder ainsi que de déterminer manuellement la position de chacun des points de contrôle. À noter que dans le cas d'une caméra de bonne qualité, où la distorsion radiale est faible, cette approximation de la distorsion radiale ne sera pas nécessaire.

3.3 Utilisation de la TLD en estimation initiale des paramètres

3.3.1 Nécessité d'approximation des paramètres

Afin de déterminer les paramètres intrinsèques du système caméra-lentille, on aura besoin de résoudre un système comportant quinze variables libres $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \mu_0, \nu_0, f_x, f_y, \omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0)$. Puisque nous utilisons une méthode numérique afin de déterminer les coefficients satisfaisant le système d'équation pour chaque point de contrôle de la cible présent dans l'image, il est possible que l'algorithme se retrouve coincé dans un minimum local. Afin d'éviter cette possibilité, on doit choisir judicieusement les valeurs de départ de l'algorithme de recherche numérique.

Dans le cas des paramètres de distorsion, on peut supposer que ces derniers sont nuls. On applique donc la supposition que le système de lentilles ne comporte aucun défaut de forme. Cette valeur de départ nulle pour tous les paramètres de distorsion ne représente pas de risque de dérapage de la procédure.

Tableau I
Paramètres estimés de distorsion du modèle.

Distorsion radiale 2 ^{ème} ordre	k_1	0
Distorsion radiale 4 ^{ème} ordre	k_2	0
Distorsion radiale 6 ^{ème} ordre	k_3	0
Distorsion tangentielle horizontale	k_4	0
Distorsion tangentielle verticale	k_5	0

Le point d'application des distorsions éventuellement évaluées peut, quant à lui, être placé au centre de l'image. Cette supposition ne comporte pas de risques non plus, puisque dans le cas de la majorité des défauts de forme de lentilles, le déplacement engendré par les distorsions radiales et tangentielles ne déplace le point d'application que de façon marginale du centre de l'image.

Tableau II
Paramètres estimés de centre d'application des distorsions radiales et tangentielles.

Pont d'application horizontal	u_0	Centre de l'image
Pont d'application vertical	v_0	Centre de l'image

La distance focale et le facteur d'échelle ont une influence très importante sur l'équilibre du système de cinquième ordre. Il est toujours possible d'utiliser un facteur d'échelle unitaire comme valeur de départ, mais la distance focale n'est pas toujours connue, surtout dans le cas de jeux de lentilles complexe dont cette distance est ajustable. C'est pourquoi nous avons besoin d'une approximation crédible comme valeur de départ de la solution numérique.

3.3.2 Construction du modèle de la TLD

La modélisation de la transformation linéaire directe est basée sur le principe de transformation de coordonnées des points de l'univers pour les projeter dans le référentiel de la caméra. Cette méthode développée par Aziz et Karara [12] permet l'utilisation de matrices de transformation linéaires, ce qui rend le problème plus facile à solutionner.

Il est tout d'abord nécessaire de créer un référentiel de coordonnées pour la caméra, puis d'en déterminer la relation avec le référentiel de l'espace. Soit le système suivant :

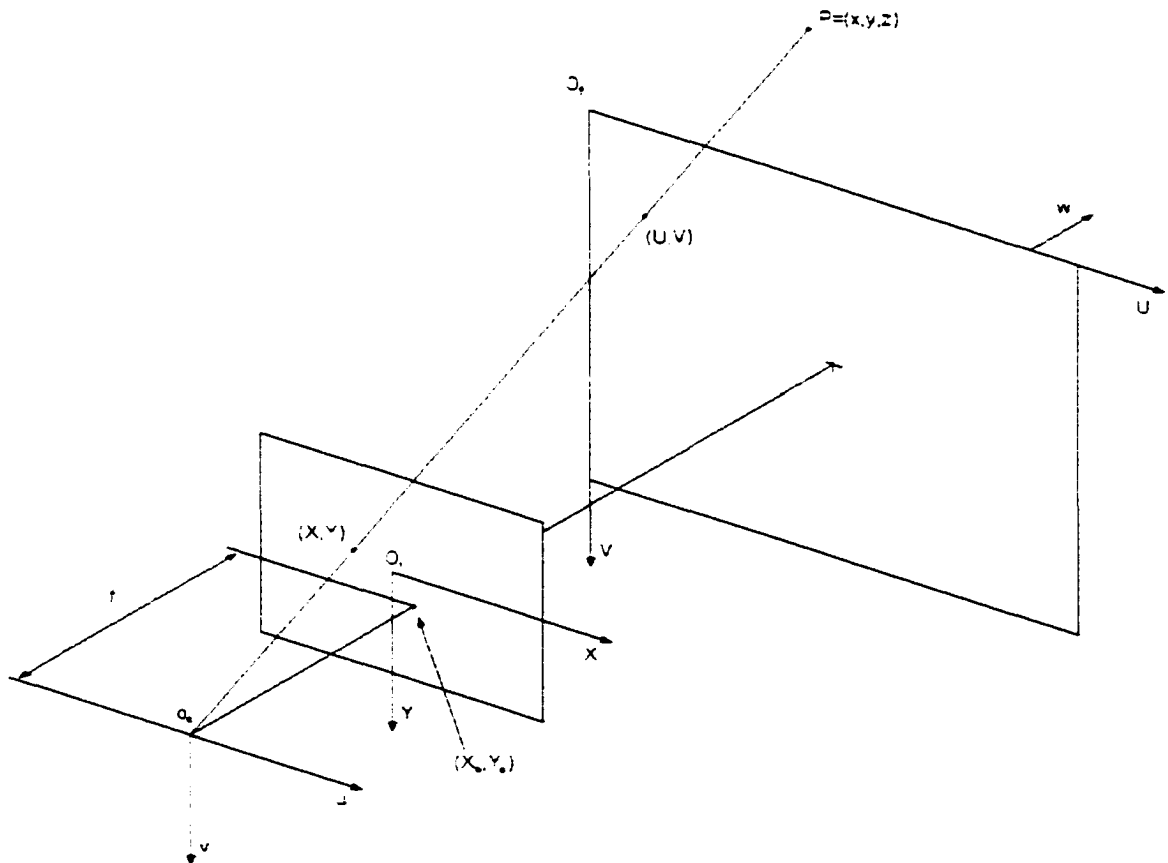


Figure 23 Système de référence de la TLD.

Où P est un point de l'espace situé à (x,y,z) , projeté dans le référentiel de caméra $\mathbf{o}_c\mathbf{uvw}$. La trajectoire de l'axe de ce point en relation au référentiel de caméra et à la position de l'image génère un point d'intersection (X,Y) , représentant la position de l'image du point créée par les éléments optiques possédant une distance focale f . La projection linéaire de cet axe du point appliquée au capteur de la caméra donnera un point de coordonnées (U,V) .

On définit alors la relation entre les coordonnées (x,y,z) du point de l'espace et ses coordonnées (u,v,w) dans le référentiel de caméra $\mathbf{o}_c\mathbf{uvw}$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + T \quad (3.2)$$

Tel que R est une matrice de rotation orthonormale et T représente une translation du point vers la caméra :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

L'intersection de l'axe optique avec le plan d'image du groupe de lentilles constitue le centre d'application (X_0, Y_0) du système de coordonnées de cette dernière. Puisque la distance séparant le référentiel $\mathbf{o}_c\mathbf{uvw}$ du plan de l'image est la distance focale f , la relation entre le point de formation de l'image (X,Y) et ce référentiel peut être définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

L'image ensuite perçue par la caméra est le résultat de la projection du point (X,Y) à partir du référentiel de l'image $\mathbf{O}_i\mathbf{XY}$ dans celui du capteur $\mathbf{O}_r\mathbf{UV}$. Cette projection, perçue par un capteur dont les pixels sont de dimension horizontale S_x et verticale S_y , peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x^{-1} & 0 & U_0 \\ 0 & S_y^{-1} & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Où (U,V) représente la position d'un point sur le capteur de la caméra dont le centre d'application est (U_0, V_0) .

En combinant les équations (3.2) à (3.4), on peut former la transformation complète suivante :

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = FR' [I, -T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Tel que :

$$F = \begin{bmatrix} fS_x^{-1} & 0 & U_0 \\ 0 & fS_y^{-1} & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.3 Méthode de solution de la TLD

Dans le but de solutionner le système linéaire ainsi créé, et d'obtenir une information qui nous permette d'extraire certains paramètres intrinsèques du système caméra-lentilles, il est possible d'utiliser la transformation linéaire directe (TLD). Cette transformation se

propose de construire une matrice de paramètres artificiels nommés « paramètres L », qui permettront l'extraction de certaines valeurs intrinsèques du système, en particulier la distance focale.

La méthode TLD se propose de créer une matrice de paramètres L qui définit la transformation appliquée en (3.5) :

$$L = \frac{1}{\alpha} FR\{I, -T\} \quad (3.6)$$

Tel que :

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & L_4 \\ L_5 & L_6 & L_7 & L_8 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha = -(r_{13}x_0 + r_{23}y_0 + r_{33}z_0)$$

On peut alors redéfinir la relation entre un point de l'espace de coordonnées (x, y, z) et son image située à (U, V) par la relation :

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = \alpha L \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ce qui nous permet de définir les coordonnées d'un point de l'image :

$$U = \frac{xL_1 + yL_2 + zL_3 + L_4}{xL_9 + yL_{10} + zL_{11} + 1} \quad (3.8)$$

$$V = \frac{xL_5 + yL_6 + zL_7 + L_8}{xL_9 + yL_{10} + zL_{11} + 1} \quad (3.9)$$

On fait ensuite abstraction de la translation effectuée par T, afin de permettre de définir une relation de distance entre les deux référentiels par le biais de la projection. Cette méthode [4] permet de définir la sous-relation suivante :

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha} FR' \quad (3.10)$$

On applique ensuite la forme quadratique :

$$MM' = \frac{1}{\alpha} FR' RF' = \frac{FF'}{\alpha^2} \quad (3.11)$$

D'où on extrait ensuite les paramètres intrinsèques suivants :

$$f_x = \sqrt{(M_1 M'_1 - M_1 M'_3)(M_3 M'_3)^{-1}} \quad (3.12)$$

$$f_y = \sqrt{(M_2 M'_2 - M_2 M'_3)(M_3 M'_3)^{-1}} \quad (3.13)$$

$$U_0 = M_1 M'_1 (M_3 M'_3)^{-1} \quad (3.14)$$

$$V_0 = M_2 M'_2 (M_3 M'_3)^{-1} \quad (3.15)$$

Bien que l'application algébrique de cette méthode semble à première vue complexe, il est aisé d'utiliser un logiciel de calcul symbolique afin de solutionner un système issu de la prise d'images d'une cible connue. Cette méthode requiert la connaissance des coordonnées d'au moins six points afin d'en déterminer une solution.

3.3.4 La TLD en application

Puisque la présente méthode d'extraction de caractéristiques n'est utilisée que pour l'estimation de paramètres, la précision requise n'est pas très grande. Ceci nous permet par exemple d'extraire les paramètres de distance focale à partir de quatre points plutôt que six. En effet, il est possible de choisir les quatre coins de la cible comme points de référence, et interpoler linéairement deux nouveaux points afin de compléter le système d'équations. Cette méthode perd en précision, mais évite de biaiser la solution en utilisant des points dont l'image est déplacée par une distorsion quelconque. On obtient ainsi une approximation satisfaisante de la distance focale f , et du facteur d'échelle s_u , exprimé par (f_x/f_y) .

3.4 Modèle non linéaire

3.4.1 Modèle de base linéaire

Le modèle de base du système caméra-lentille est constitué d'une transformation linéaire, caractérisant le modèle trou d'aiguille. Ce modèle est similaire à celui utilisé en TLD, mais on ne recherchera pas de solution à ce modèle seul. La représentation du modèle linéaire est exprimée en (3.5).

3.4.2 Augmentation du modèle avec distorsions non linéaires

Deux modèles de distorsion, soit radiale et tangentielle, sont utilisés afin d'augmenter le modèle linéaire de base. On utilise les équations (2.5), (2.10) et (2.11) afin de déduire le modèle complet suivant :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x (\tilde{u}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(t)}) \\ f_y (\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(t)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.4.3 Simplification des paramètres de distorsion linéaire

La distorsion de type linéaire n'est applicable que dans les cas où des éléments du système, soit la cible ou le capteur de la caméra, comportent des erreurs de linéarité. Puisque la cible est produite dans le but d'effectuer un étalonnage, ses dimensions et son orthogonalité sont maximisées, et la précision de cette dernière est donc suffisante pour en négliger la non linéarité.

Dans le cas du capteur de caméra, il est sujet aux erreurs de linéarités issues des procédés de fabrication de semi-conducteurs. Les techniques modernes de fabrication « Multi-layer process », nécessaire pour l'intégration d'une surface continue d'éléments photosensibles, permet d'obtenir une précision de placement des éléments de perception correspondant à la dimension minimale de placement d'un simple transistor, soit en moyenne $0,35 \mu\text{m}$. La distorsion linéaire correspond donc au maximum à une déviation complète de $0,35 \mu\text{m}$ sur une étendue du capteur, soit environ 10mm.

L'angle résultant de déviation sera alors 0,002 degrés. L'erreur ainsi engendrée en position de l'image s'exprime en pixels, et correspond à la déviation rapportée sur la résolution. Un capteur de 1024 pixels s'étendant sur 10mm aura alors une erreur maximale de 0,036 Pixels.

Heikkila et Silvén [1], ont déterminés lors de leurs expérimentations, que la distorsion linéaire ne représentait pas une erreur significative, même dans des cas de précision extrême. La modélisation de l'erreur linéaire se confond naturellement avec la distorsion tangentielle, et les coefficients de celle-ci seront alors automatiquement biaisés lors de la recherche de solution afin de compenser pour les éléments de distorsion linéaire étant présents dans le capteur de la caméra.

Bien que plusieurs facteurs physiques soient alors reliés aux nouveaux paramètres de distorsion tangentielle, cela n'affectera pas de façon négative la performance de la procédure d'étalonnage.

3.4.4 Construction de la fonction d'optimisation

La solution du système repose sur l'élaboration d'une fonction d'erreur de position de chacun des pixels. Cette fonction sera ensuite soumise à un algorithme d'optimisation numérique, qui tentera alors de trouver la solution satisfaisant le système d'équations par la méthode des moindres carré. Nous devons donc déterminer l'erreur de position d'un élément de contrôle mesuré en (u, v) , par rapport à sa position théorique de projection (U, V) :

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^N (U_i - u_i)^2 + \sum_{i=1}^N (V_i - v_i)^2 \quad (3.17)$$

3.4.5 Contraintes de la fonction d'optimisation

Le modèle numérique ainsi présenté devra être assujéti à des contraintes. Il n'est en effet pas possible, par exemple, qu'un système de lentille possède une distance focale nulle ou négative. Les paramètres de distorsion radiale et axiale modélisent un polynôme appliqué en deux dimensions, et leurs facteurs peuvent être positifs ou négatifs. Puisque l'on ne connaît pas la nature initiale de ces distorsions, il est mal aisé de déterminer des bornes d'application pour ces paramètres. On choisit donc de ne pas imposer de contraintes sur les coefficients de distorsion.

Le point d'application principal de la distorsion (u_0, v_0) , ne peut lui non plus être assujéti à une contrainte. On ne connaît pas en effet la position de celui-ci, et il est possible d'envisager que ce point d'application soit en dehors de l'image elle-même. On ne peut donc pas imposer de contraintes au point d'application des éléments de distorsion.

En ce qui concerne la distance focale de lentille, la contrainte de base $f > 0$ sera établie, et puisque cette distance focale est exprimée en pixels, sa valeur réelle est impossible à estimer avant d'avoir effectué un minimum de mesures et de calculs. On choisit donc de ne pas imposer de borne supérieure à cette variable.

Il n'y aura donc qu'une seule contrainte au modèle numérique :

$$f > 0 \quad (3.18)$$

3.5 Distribution des erreurs de position de chaque pixel de l'image

Une fois les neuf paramètres intrinsèques déterminés, il est nécessaire de valider le succès de l'opération. On utilise donc un vecteur contenant la différence entre chacune des positions de points de contrôle (u, v) et la position théorique en projection (U, V) . Ce vecteur est ensuite analysé statistiquement et graphiquement afin de déterminer l'amplitude et la distribution de l'erreur résiduelle de position de l'ensemble des pixels.

Dans un premier temps, on choisit de tracer un graphique de position de l'erreur de chacun des points de contrôle, afin d'en déterminer rapidement l'enveloppe. Une projection de cette image sur les deux axes respectifs x et y résulte en une distribution statistique de l'erreur affectant l'ensemble des points de contrôle de l'image.

3.6 Méthode de correction des images

Le problème de projection inverse permettant de retrouver les coordonnées du point de l'espace à partir des coordonnées de l'image ne possède pas de solution symbolique. Une égalité devra être trouvée, puis une fonction d'optimisation créée afin de permettre l'application d'une solution numérique. La découverte de la position du point de

l'espace n'est en réalité pas nécessaire, puisque l'on recherche uniquement les coordonnées du point de l'image si cette dernière n'était pas affectée de distorsion.

On pose alors de (3.16) :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x (\tilde{u}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(n)}) \\ f_y (\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(n)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

Où l'on recherche $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$.

Puisque l'on possède (u_i, v_i) , f , (u_0, v_0) ainsi que tous les paramètres de distorsion radiale et tangentielle, il est alors possible de créer une égalité simple en recherchant l'égalité de termes de (3.16) :

$$F_{\min} = \left\| \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x (\tilde{u}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(n)}) \\ f_y (\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(n)}) \end{bmatrix} \right\| \quad (3.19)$$

Il est important de noter que puisque l'on recherche les coordonnées de points $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$, le modèle ne possède pas de contraintes de recherche. En effet, ces points peuvent se trouver en dehors de l'image actuelle, se retrouvant à l'intérieur à la suite de l'application de la distorsion des lentilles. Les coordonnées de ces points ne possèdent donc pas de bornes de recherche.

CHAPITRE 4

EXEMPLES D'APPLICATION

4.1 Caméra à faible résolution et forte distorsion

Dans cet exemple, une caméra CCD monochrome à balayage est utilisée. Cette caméra dont la qualité peut être qualifiée de mauvaise, possède des éléments optiques comportant des distorsions très prononcées. Nous allons tenter d'appliquer la correction d'image en déterminant au préalable les paramètres intrinsèques du système caméra-lentilles.

La caméra en question génère des images d'une résolution horizontale de 688 pixels et verticale de 470 pixels. Le transfert de la caméra vers l'ordinateur de l'information lumineuse s'effectue par un signal composite correspondant à la norme NTSC.

4.1.1 Prise d'images

En utilisant la cible précédemment définie, nous allons numériser une série de douze images représentant différents angles de vue, et couvrant l'ensemble de l'aire du capteur.

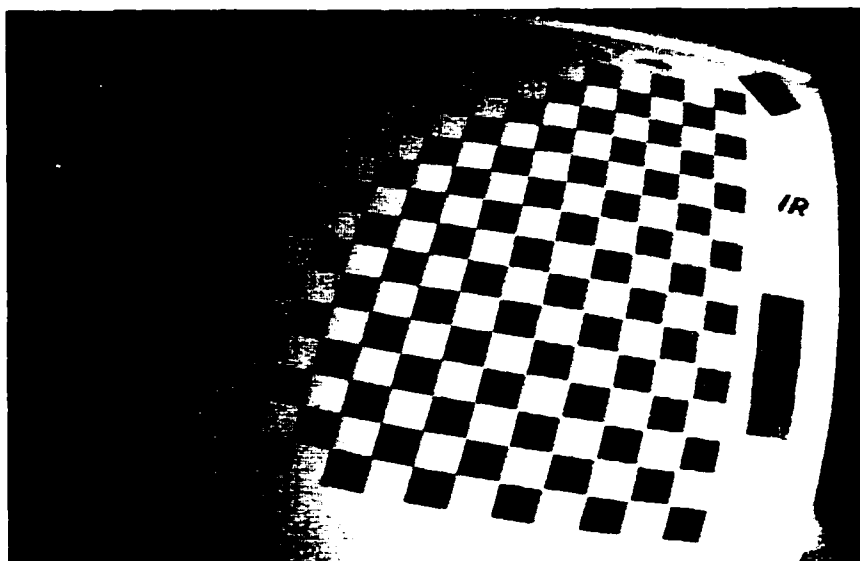


Figure 24 Exemple d'image perçue.

4.1.2 Extraction des points de contrôle

À partir des images captées, les points de contrôle doivent être extraits. Ces points représentent les intersections des zones claires et foncées. En utilisant Matlab ©, des zones extrêmes sont identifiées manuellement afin d'éviter le dérapage de la procédure, qui pourrait, dans un cas entièrement automatisé, confondre d'autres objets avec des éléments de la cible.

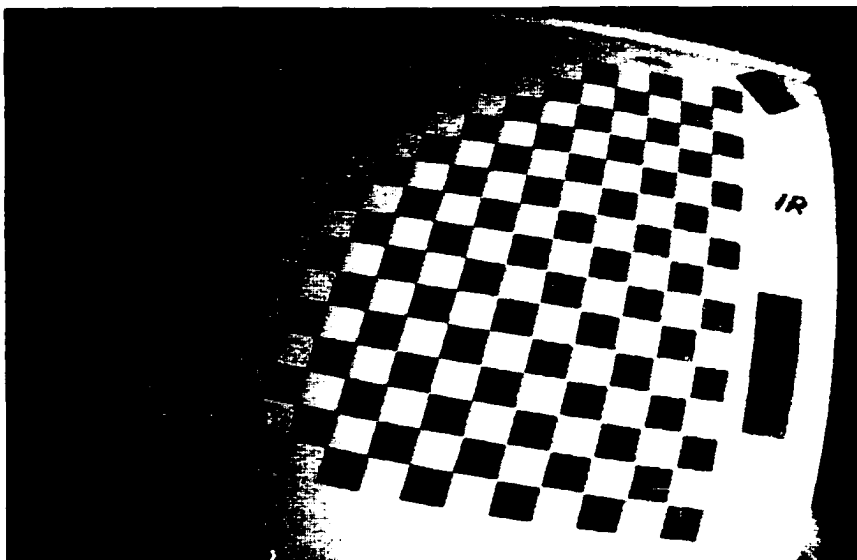


Figure 25 Sélection des zones limites.

On peut ensuite appliquer la recherche automatique des points intermédiaires de croisement. À noter que dans un premier temps, on assume que la distorsion radiale est nulle.

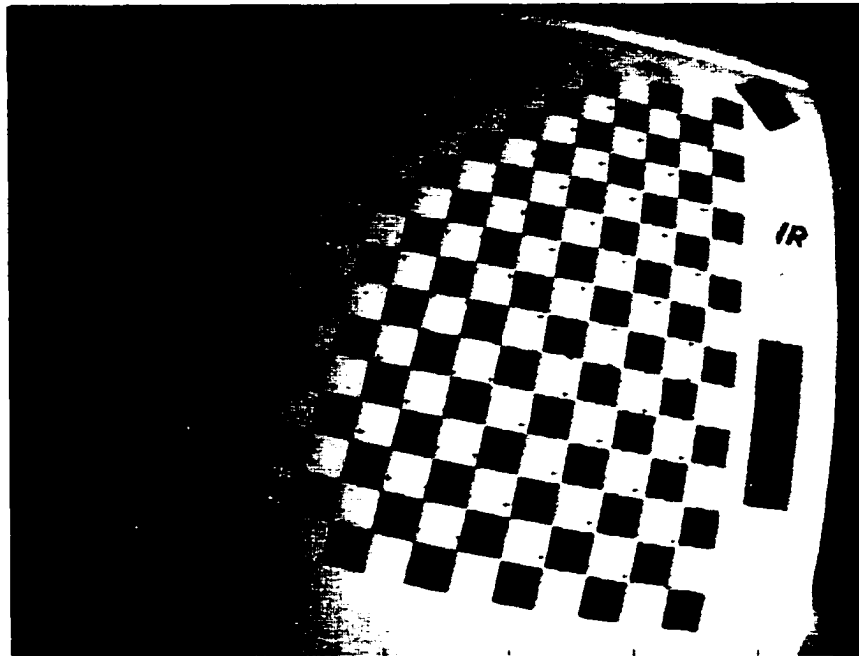


Figure 26 Estimation des points de croisement à $k_1=0$.

On constate ici que les croix ne sont pas localisées aux intersections des points de contrôle. La distorsion radiale des lentilles est si intense que la procédure de détermination automatique des points de croisement échoue. On doit donc recommencer la procédure en effectuant les suppositions suivantes :

$$k_1 = [-1..1]$$

$$u_0 = 344 \text{ (parfaitement centré)}$$

$$v_0 = 235 \text{ (parfaitement centré)}$$

On applique ainsi une distorsion radiale artificielle sans décentrage, dont la valeur est estimée.

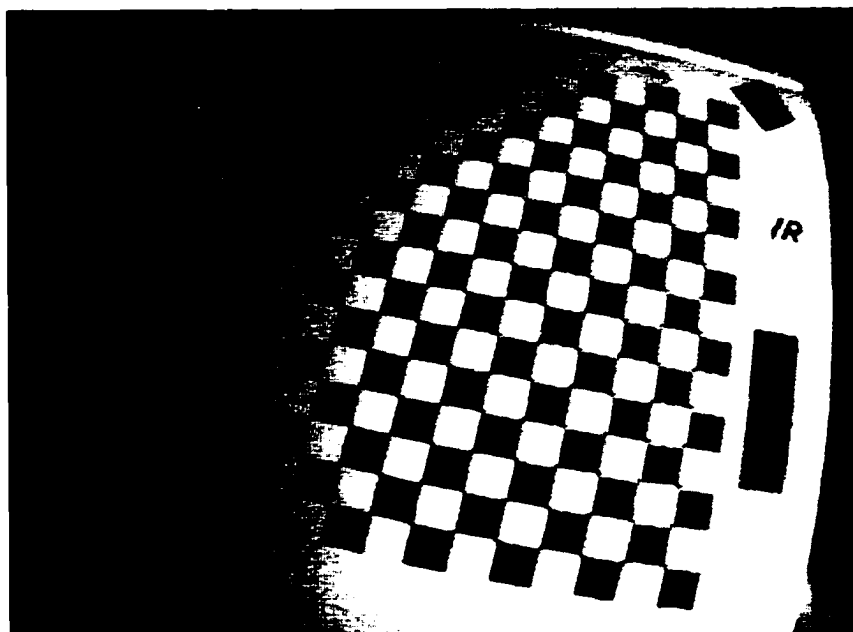


Figure 27 Estimation des points de croisement à $k_1 = -0,3$.

Il est à noter que cette procédure itérative de recherche de paramètres estimés doit être appliquée à chacune des images. En effet, la distorsion radiale des lentilles reste la même à chacune des images, mais son point principal d'application change en fonction de la position et de la distance de la cible. Dans le cas de notre approximation, nous appliquons toujours cette dernière au centre de l'image, ce qui ne lui confère pas le même effet.

Les valeurs ainsi estimées de distorsion radiale seront différents d'une image à l'autre et ne constituent en rien une estimation de la valeur finale de k_1 . Il est moins laborieux d'estimer ainsi un paramètre inconnu que de sélectionner manuellement chacune des zones d'extraction des points de contrôle.

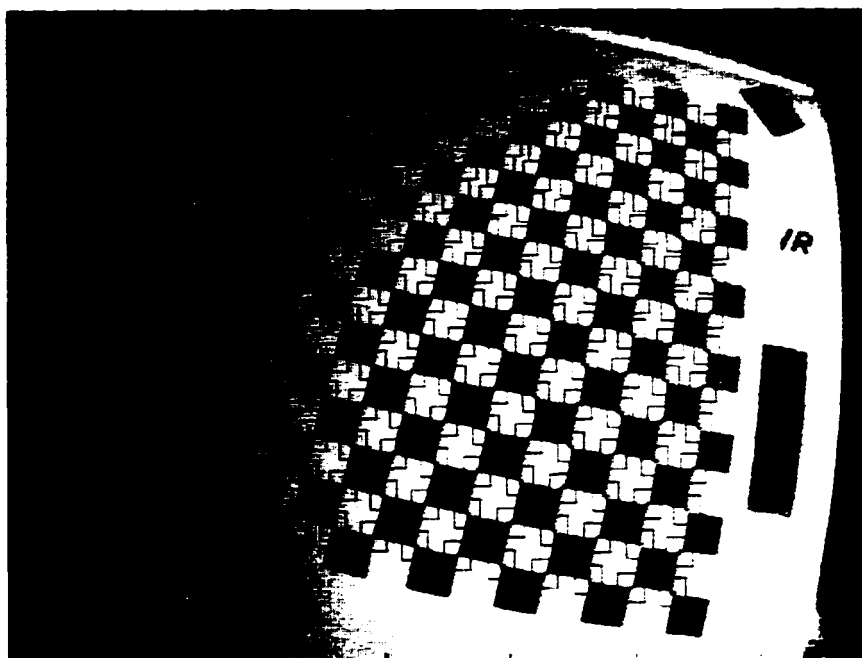


Figure 28 Zones d'extraction des points de contrôle.

On obtient ainsi deux vecteurs contenant les coordonnées des 196 points de contrôle de chacune des cibles.

4.1.3 Estimation initiale des paramètres par la Transformation Linéaire Directe

On évalue d'abord la distance focale en utilisant le tableau de points de contrôle extrait de chacune des images.

Tableau III
Résultats de l'estimation de paramètres par la TLD.

Distance focale horizontale	f_u	588,35
Distance focale verticale	f_v	534,43
Pont central d'application horizontal	u_0	344
Pont central d'application vertical	v_0	235

Tableau IV
Valeurs de départ des paramètres en solution numérique.

Distance focale horizontale	f_u	588,35
Distance focale verticale	f_v	534,43
Pont central d'application horizontal	u_0	344
Pont central d'application vertical	v_0	235
Distorsion radiale 1 ^{ère} ordre	k_1	0
Distorsion radiale 2 ^{ème} ordre	k_2	0
Distorsion tangentielle	k_3	0
Distorsion angulaire	k_4	0
Distorsion radiale 3 ^{ème} ordre	k_5	0

4.1.4 Solution numérique

On utilise ensuite la méthode de recherche de solution numérique Nelder-Mead [13] afin de déterminer la valeur des paramètres intrinsèques qui génère la moindre erreur de positionnement sur l'ensemble des points de contrôle de toutes les images en même temps. On utilise ensuite l'erreur individuelle de chaque pixel afin de former une courbe de distribution d'erreur, cette dernière permettant d'évaluer la performance du procédé.

Tableau V
Valeurs finales des paramètres en solution numérique (premier essai)

Distance horizontale	f_u	553,11
Distance horizontale	f_v	502,69
Pont central d'application horizontale	u_0	352,65
Pont central d'application verticale	v_0	248,04
Discontinuité 1 ^{ère} force	k_1	-0,38620
Discontinuité 2 ^{ème} force	k_2	0,14929
Discontinuité 3 ^{ème} force	k_3	-0,00166
Discontinuité 4 ^{ème} force	k_4	0,00248
Discontinuité 5 ^{ème} force	k_5	0,00000

4.1.4.1 Analyse de la distribution de l'erreur de position des pixels

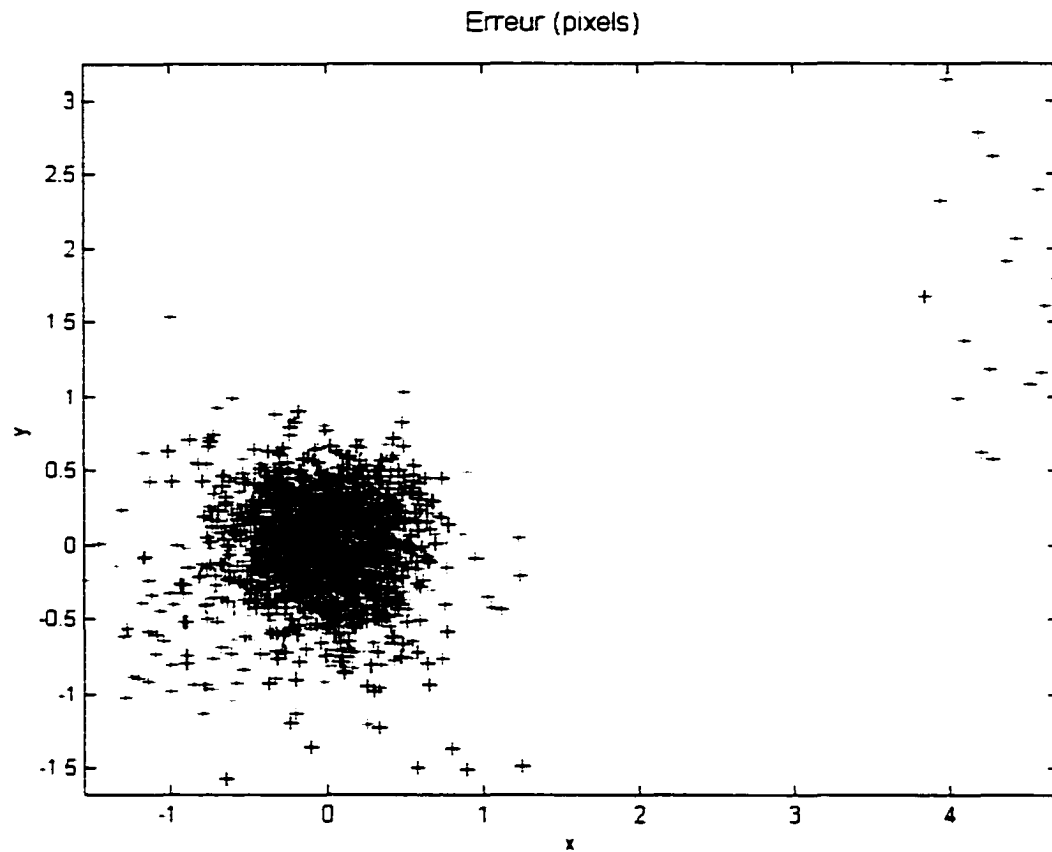


Figure 29 Distribution de l'erreur de l'ensemble des points de contrôle pour toutes les images.

On perçoit ici la dispersion engendrée par une image dans laquelle les points de contrôle ont été mal extraits, ou encore un mouvement s'est produit lors de la prise d'image, ce qui n'altère qu'un certain nombre de points, en les entachant d'une erreur d'orthogonalité qui n'est pas propre au système. Cette image est donc éliminée du vecteur de points de contrôle, puis on lance à nouveau l'algorithme d'optimisation.

4.1.5 Seconde tentative de solution

On élimine l'image causant une dispersion dans le calcul des valeurs de paramètres. On se basera alors sur 12 images plutôt que 13 comme précédemment utilisé. On lance à nouveau l'algorithme de recherche de solution numérique afin de trouver le minimum global pour le nouvel ensemble de points :

Tableau VI

Valeurs finales des paramètres en solution numérique (second essai).

Distance focale horizontale	f_u	557,30
Distance focale verticale	f_v	505,97
Pont central d'application horizontale	u_0	355,76
Pont central d'application verticale	v_0	244,98
Distorsion radiale (2 ^{ème} ordre)	k_1	-0,40000
Distorsion radiale (4 ^{ème} ordre)	k_2	0,16213
Distorsion tangentielle	k_3	-0,00030
Distorsion tangentielle	k_4	0,00145
Distorsion radiale (6 ^{ème} ordre)	k_5	0,00000

4.1.5.1 Distribution de l'erreur

La nouvelle solution possède des paramètres légèrement différents. L'élimination de l'image comportant des erreurs permet d'obtenir une distribution d'erreur de position qui soit plus près de ce que l'on recherche.

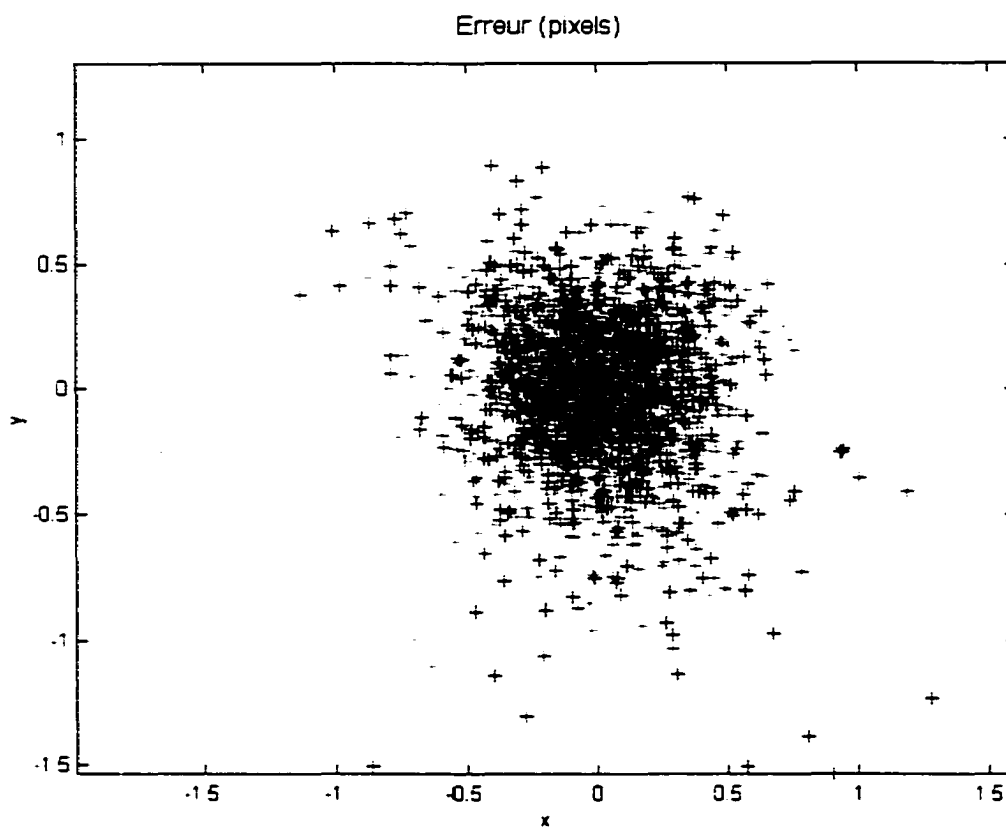


Figure 30 Distribution de l'erreur de position des points de contrôle du modèle (second essai).

On projette cette erreur sur les deux axes respectivement, de façon à connaître la forme de la distribution de cette erreur.

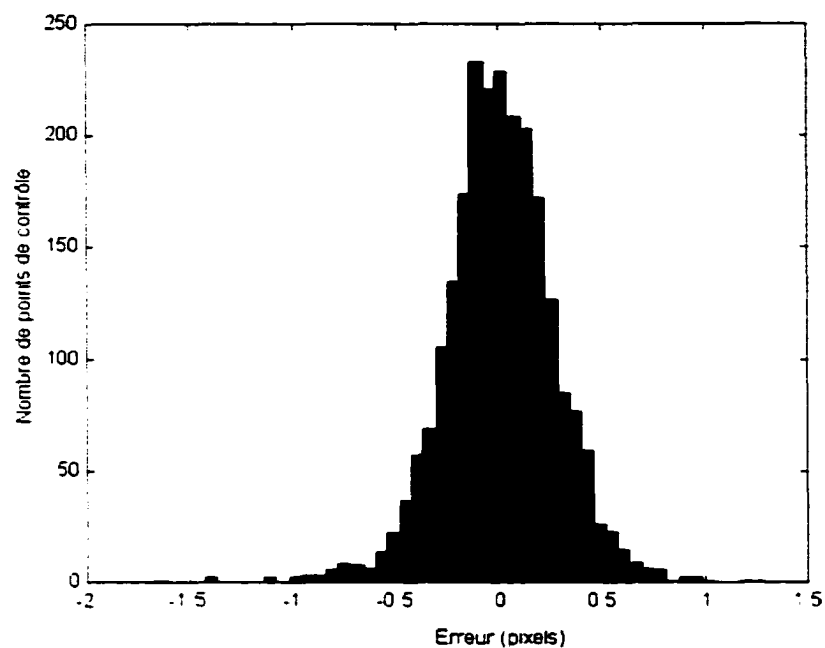


Figure 31 Distribution statistique de l'erreur de position sur l'axe horizontal.

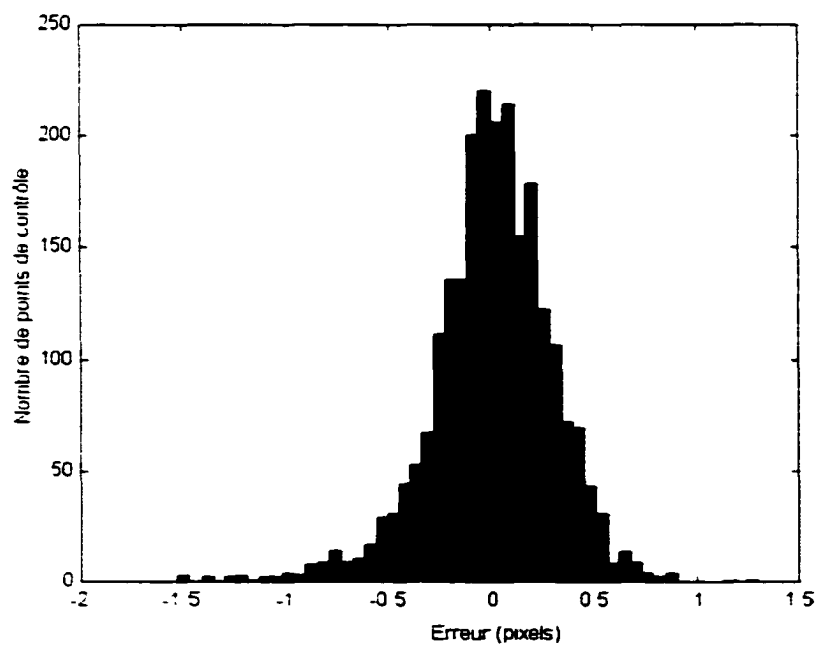


Figure 32 Distribution statistique de l'erreur de position sur l'axe vertical.

Ces distributions statistiques permettent d'évaluer l'étendue de l'erreur de position. Centrées sur une erreur nulle, ces courbes possèdent les caractéristiques suivantes :

$$\mu_x = 0, \sigma_x = 0,270 \text{ (Pixels)}$$

$$\mu_y = 0, \sigma_y = 0,301 \text{ (Pixels)}$$

4.1.6 Analyse d'application des erreurs du modèle

Afin de compléter l'analyse du modèle, on désire examiner les paramètres d'application de la distorsion. Les deux types de distorsion, soit radiale et tangentielle, sont appliqués à un point central (u_0, v_0) , et possèdent tous deux des coefficients respectifs. Il est intéressant d'utiliser un champ de vecteurs, assorti de courbes de niveau, afin de visualiser la forme d'application de chacune de ces distorsions.

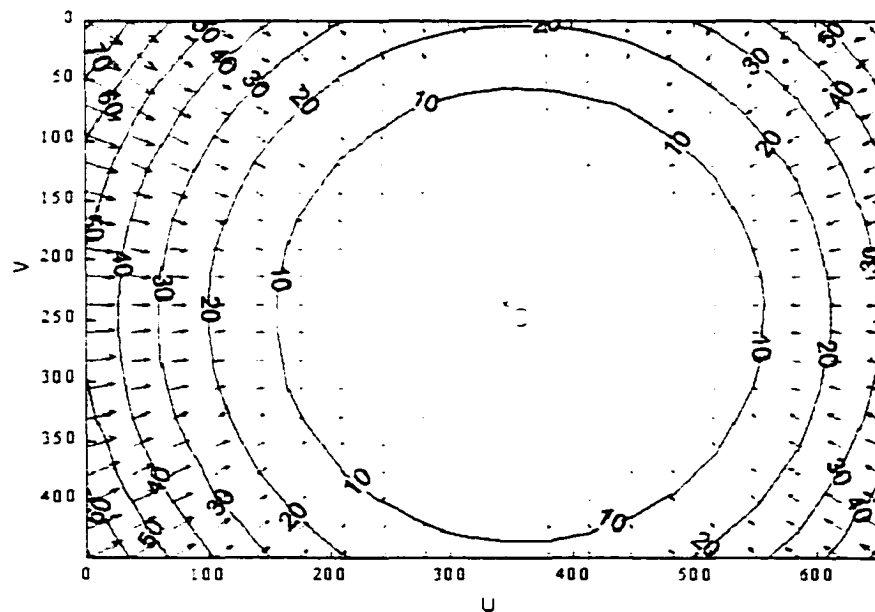


Figure 33 Distribution d'intensité de la distorsion radiale du modèle.

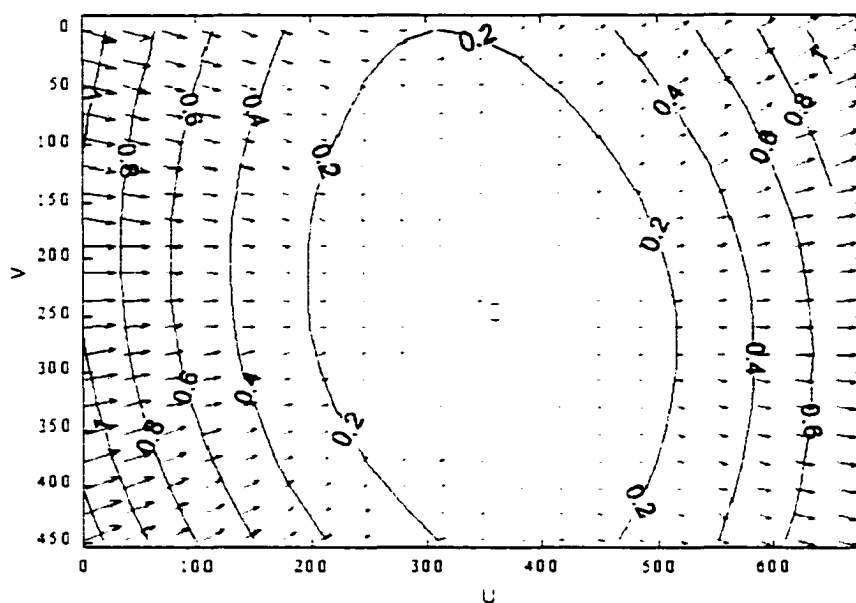


Figure 34 Distribution d'intensité de la distorsion tangentielle du modèle.

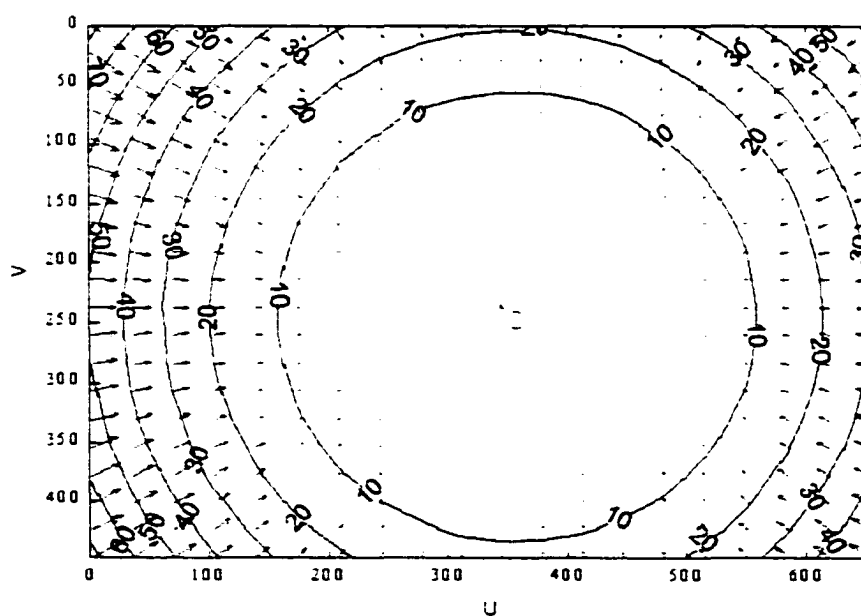


Figure 35 Distribution d'intensité de la distorsion totale du modèle.

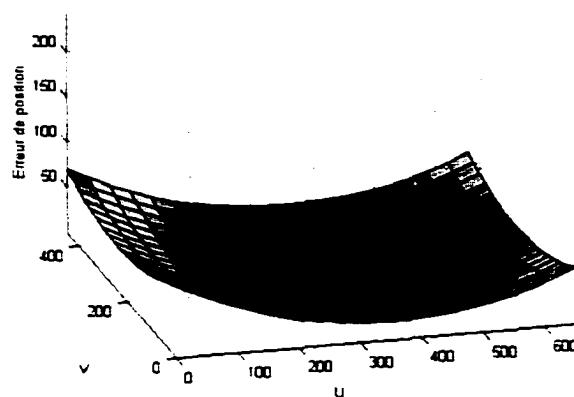


Figure 36 Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion radiale.

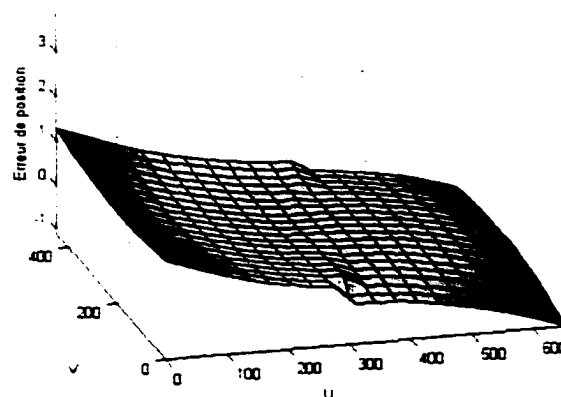


Figure 37 Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion tangentielle.

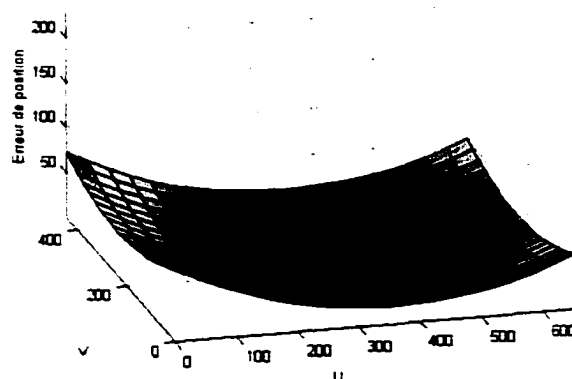


Figure 38 Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion totale.

4.1.7 Application de la correction

On tente ensuite d'évaluer qualitativement la correction apportée à une image quelconque prise par cette caméra. On utilise donc une image de la même cible, puisqu'elle permet d'évaluer à l'œil les erreurs de forme d'un objet linéaire.

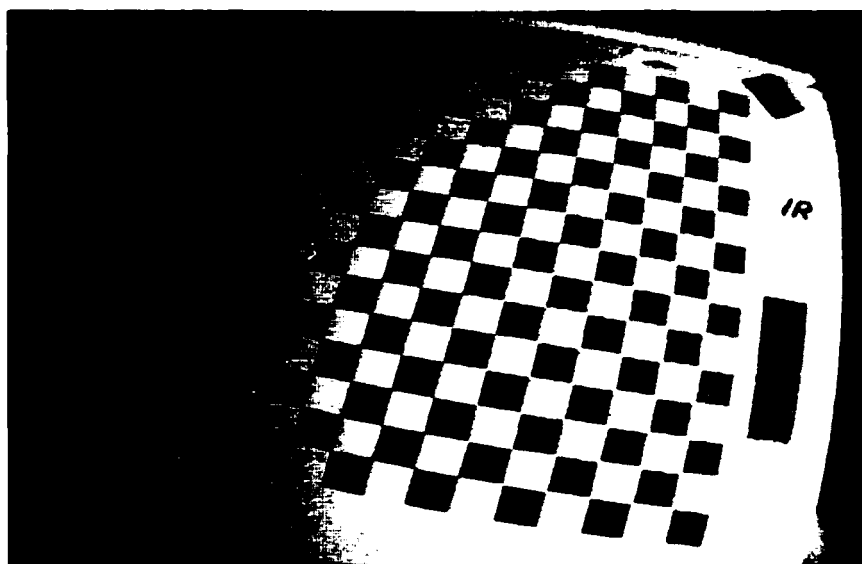


Figure 39 Image originale empreinte de distorsion.

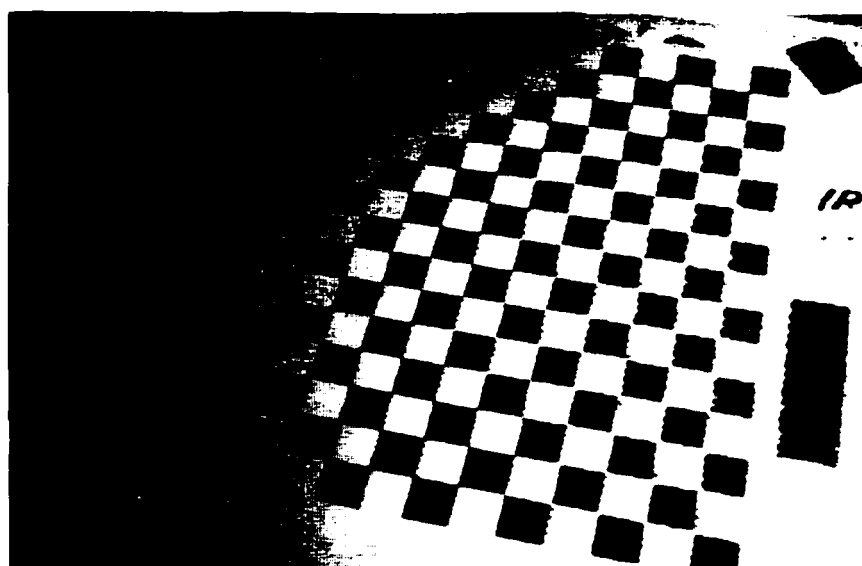


Figure 40 Image corrigée.

On perçoit ici que la correction est satisfaisante d'un point de vue qualitatif. On utilise un logiciel de dessin très simple afin de générer des lignes superposées aux bordures des éléments de la cible. Cette méthode rapide de test permet de constater que les objets linéaires sont très droits, peu importe les illusions d'optique pouvant se manifester par l'utilisation d'une telle cible.

4.2 Caméra à moyenne résolution et faible distorsion

Dans ce second exemple, une caméra modèle Kodak DC215 est utilisée. Cette caméra possède un capteur dont la résolution horizontale est de 1152 pixels et une résolution verticale de 864 pixels. Malheureusement, il est impossible d'extraire les images de la caméra en mode direct, où l'information de chacun des pixels demeurerait intacte. En effet, cette caméra archive les images captées en utilisant l'algorithme de compression JPEG. Cette compression, bien qu'ajustable, engendre une perte de qualité perceptible dont les effets sur la présente procédure sont inconnus.

4.2.1 Prise d'images

En utilisant la même cible, nous allons numériser une série de huit images représentant différents angles de vue, et couvrant l'ensemble de l'aire du capteur.

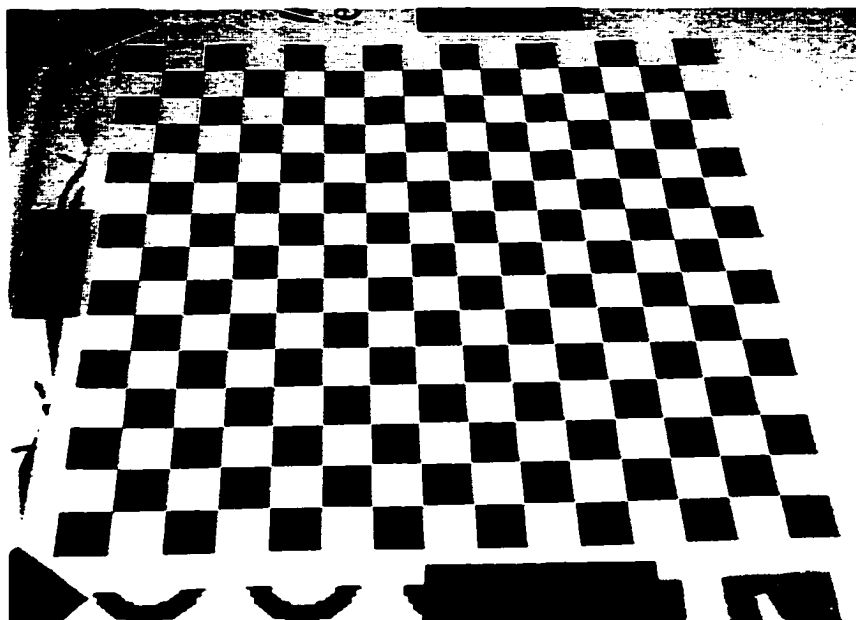


Figure 41 Exemple d'image perçue.

4.2.2 Extraction des points de contrôle

Comme dans le premier exemple, on identifie les coordonnées des extremums de la cible en identifiant quatre zones qui contiennent les intersections recherchées.

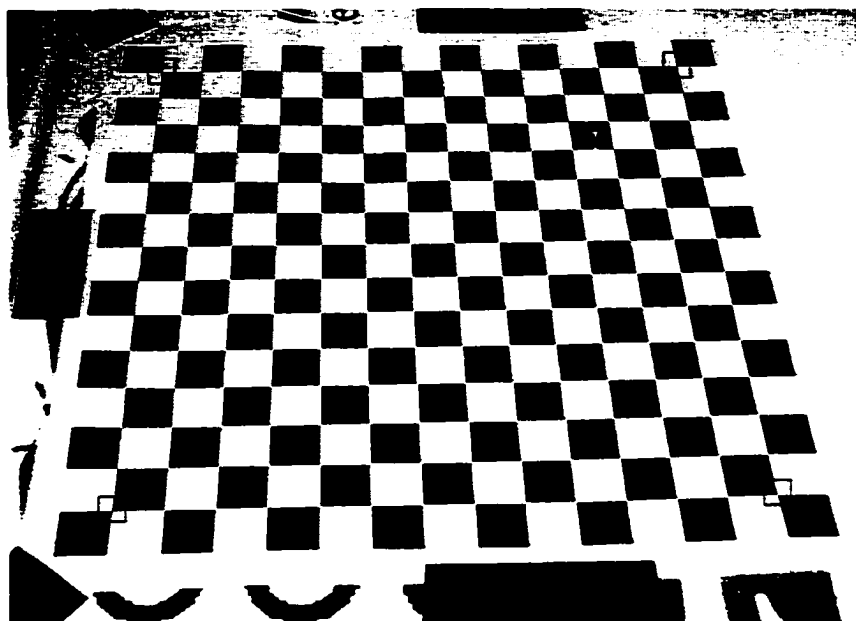


Figure 42 Sélection des zones limites.

L'algorithme de recherche automatique permet ensuite de déduire la position des points de contrôle de la cible en effectuant une interpolation linéaire à l'intérieur de la zone trapézoïdale identifiée par les extremums. Puisque les images générées par cette caméra sont de meilleure qualité et ne présente que très peu de distorsion radiale, l'approximation de la position des points de contrôle est suffisamment précise pour ne pas avoir à effectuer une estimation de la distorsion. On assume donc $k_1=0$.

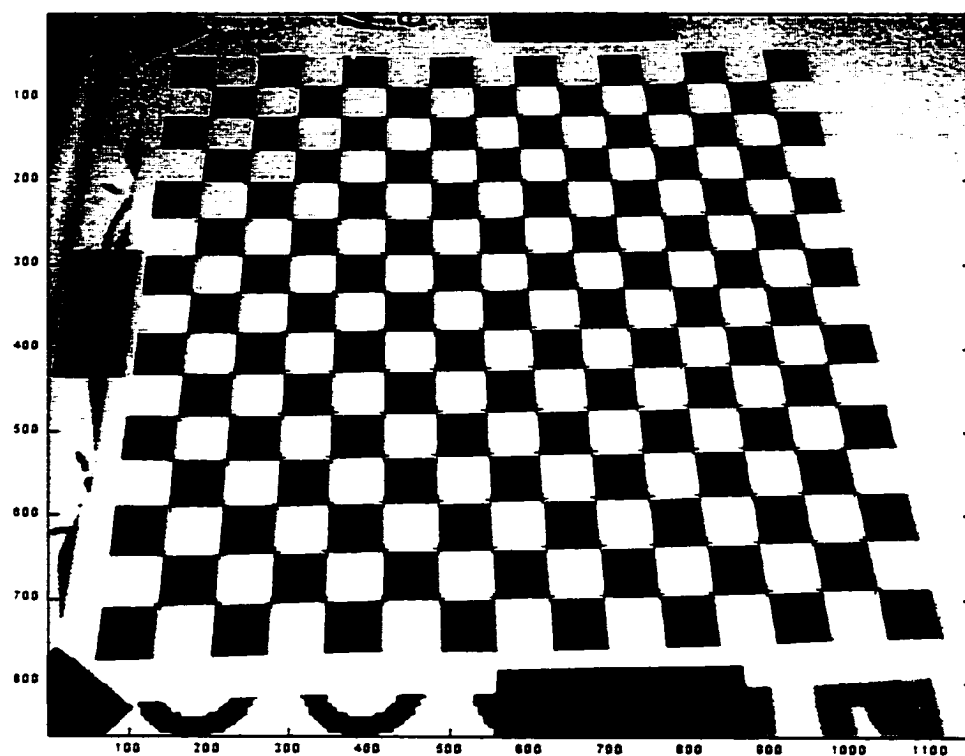


Figure 43 Estimation des points de croisement à $k_1=0$.

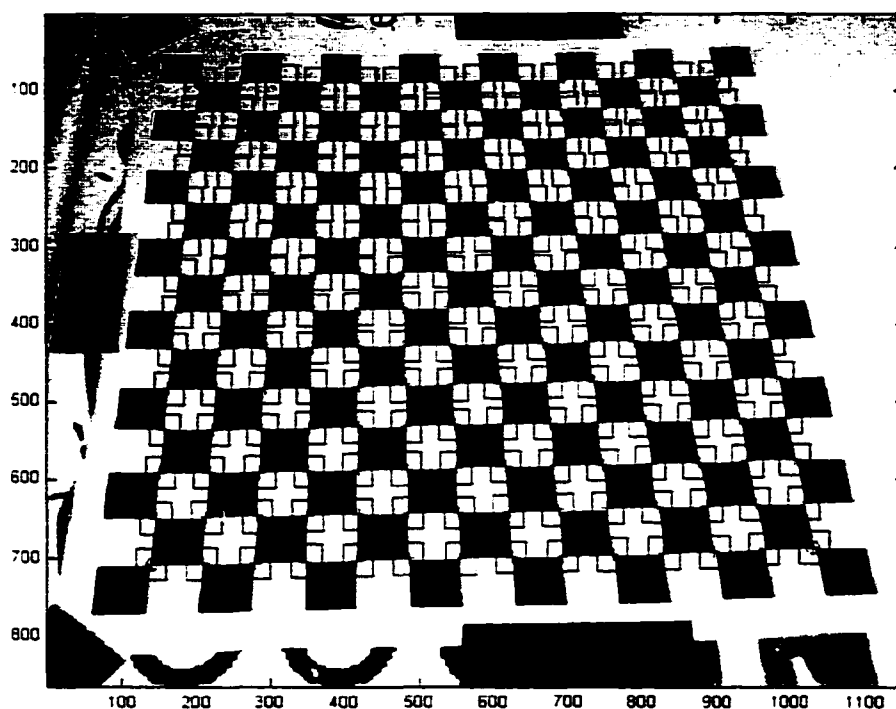


Figure 44 Zones d'extraction des points de contrôle.

On obtient les mêmes vecteurs que dans le premier exemple, mais sur huit images seulement. On utilise ensuite les mêmes méthodes de solution afin de déterminer les paramètres intrinsèques de ce système.

4.2.3 Estimation initiale des paramètres par la Transformation Linéaire Directe

On évalue d'abord la distance focale en utilisant le tableau de points de contrôle extrait de chacune des images.

Tableau VII
Résultats de l'estimation de paramètres par la TLD.

Distance focale horizontale	f_u	1854,75
Distance focale verticale	f_v	1858,39
Pont central en x	u_0	575,5
Pont central en y	v_0	431,5

Tableau VIII
Valeurs de départ des paramètres en solution numérique.

Distance focale horizontale	f_u	1854,75
Distance focale verticale	f_v	1858,39
Pont central d'application horizontale	u_0	575,5
Pont central d'application verticale	v_0	431,5
Distorsion radiale 2 ^{ème} ordre	k_1	0
Distorsion radiale 4 ^{ème} ordre	k_2	0
Distorsion tangentielle	k_3	0
Distorsion tangentielle	k_4	0
Distorsion cubique (6 ^{ème} ordre)	k_5	0

4.2.4 Solution numérique

On utilise encore ici la méthode de recherche de solution numérique Nelder-Mead [13] afin de déterminer la valeur des paramètres intrinsèques qui génère la moindre erreur de positionnement sur l'ensemble des points de contrôle de toutes les images en même temps. On utilise ensuite l'erreur individuelle de chaque pixel afin de former une courbe de distribution d'erreur, cette dernière permettant d'évaluer la performance du procédé.

Tableau IX
Valeurs finales des paramètres en solution numérique.

Distance focale horizontale	f_u	1843,65
Distance focale verticale	f_v	1847,00
Pont central d'application horizontale	u_0	554,11
Pont central d'application verticale	v_0	415,96
Distorsion radiale (2 ^e ordre)	k_1	-0,02839
Distorsion radiale (4 ^e ordre)	k_2	0,13234
Distorsion tangentielle	k_3	-0,00028
Distorsion tangentielle	k_4	0,00119
Distorsion radiale (6 ^e ordre)	k_5	0,00000

4.2.4.1 Distribution de l'erreur

Afin de vérifier la performance de la solution numérique, on évalue l'erreur de position de chacun des pixels. On utilise un graphe qui illustre l'erreur de position dans les deux axes principaux. Le calcul de cette erreur est basé sur la différence entre la position de chaque pixel observé et du pixel correspondant dans la grille de référence issue de l'application des paramètres.

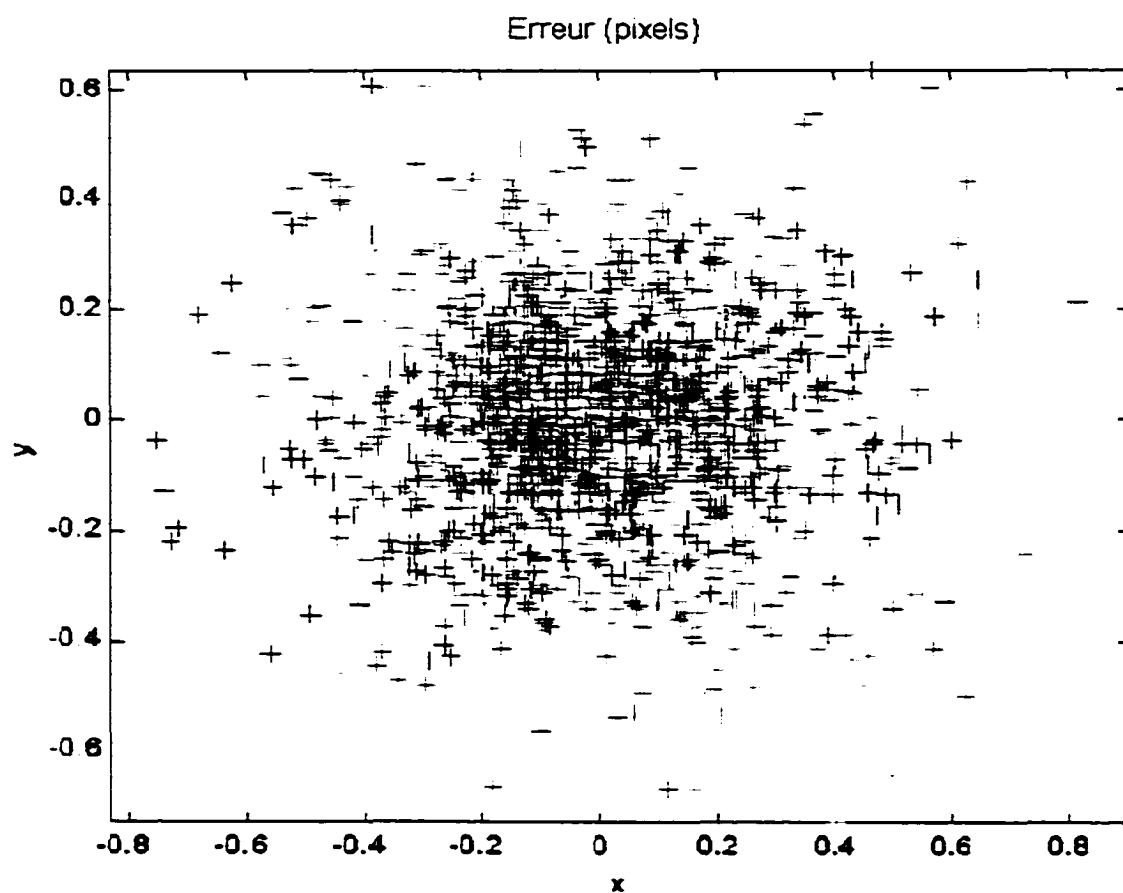


Figure 45 Erreur de position des pixels selon le modèle utilisé.

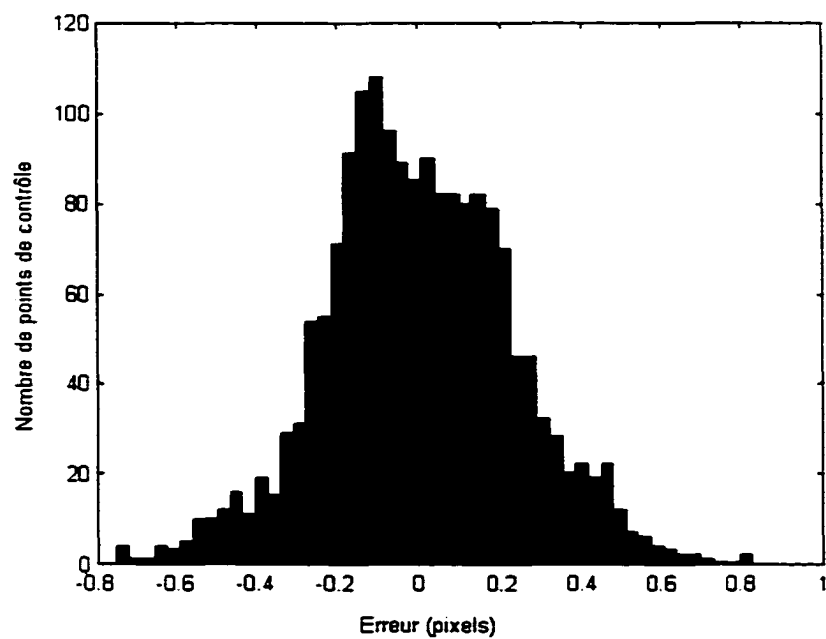


Figure 46 Distribution de l'erreur de position des pixels selon l'axe horizontal.

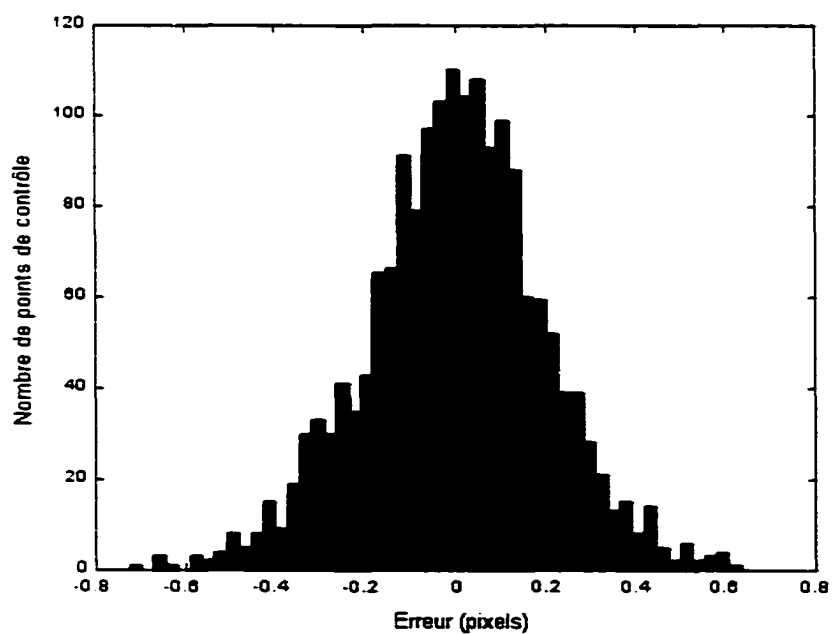


Figure 47 Distribution de l'erreur de position des pixels selon l'axe vertical.

Ces distributions statistiques possèdent les caractéristiques suivantes :

$$\mu_x = 0, \sigma_x = 0,235 \text{ (Pixels)}$$

$$\mu_y = 0, \sigma_y = 0,198 \text{ (Pixels)}$$

4.2.5 Analyse d'application des erreurs du modèle

On désire visualiser les erreurs contenues dans le modèle utilisé. Pour ce faire, on crée un champ de vecteurs d'application en un certain nombre de points de l'image. On assortit ensuite le champ de vecteurs de courbes topographiques qui nous permettent d'évaluer la progression des éléments de distorsion en fonction de leur position.

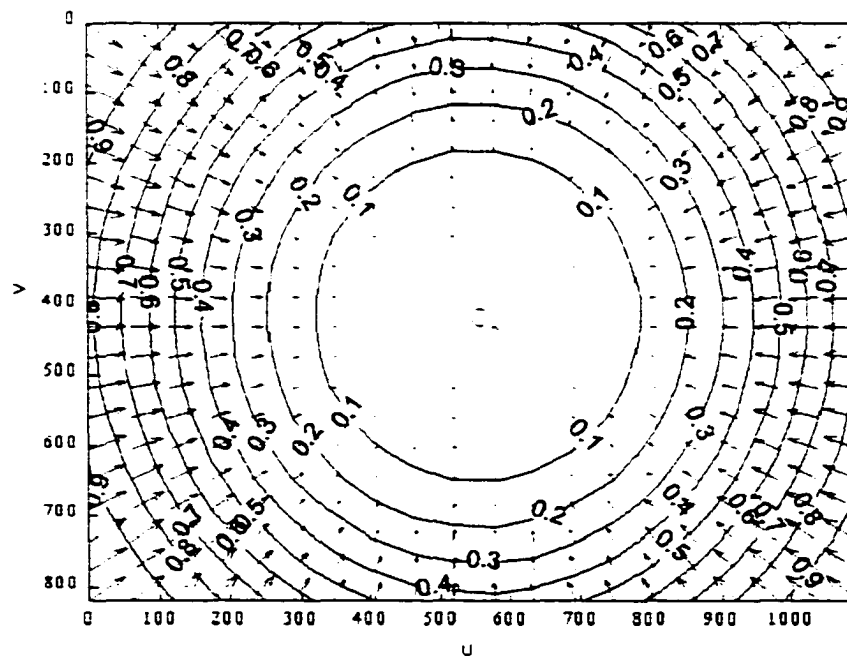


Figure 48 Distribution d'intensité de la distorsion radiale du modèle.

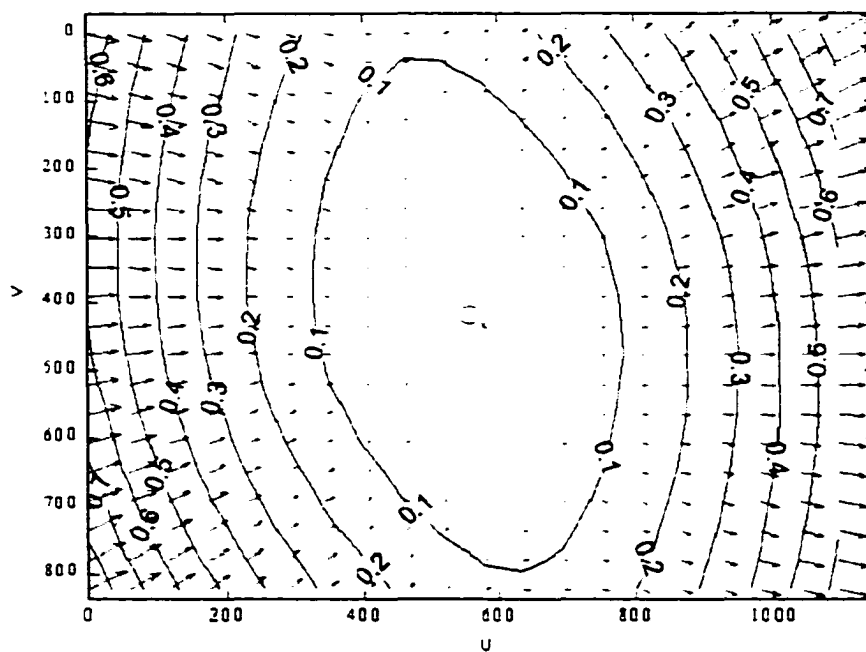


Figure 49 Distribution d'intensité de la distorsion tangentielle du modèle.

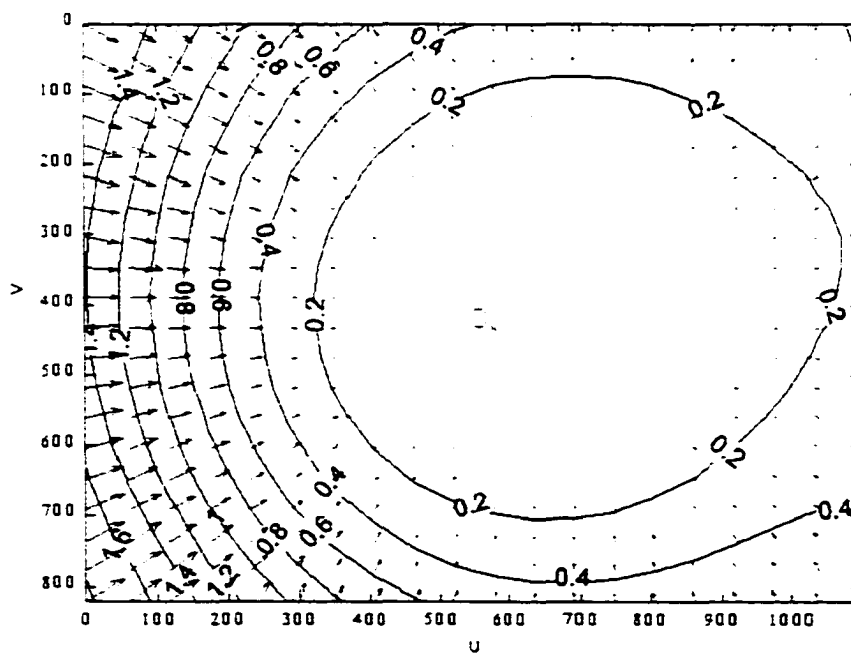


Figure 50 Distribution d'intensité de la distorsion complète du modèle.

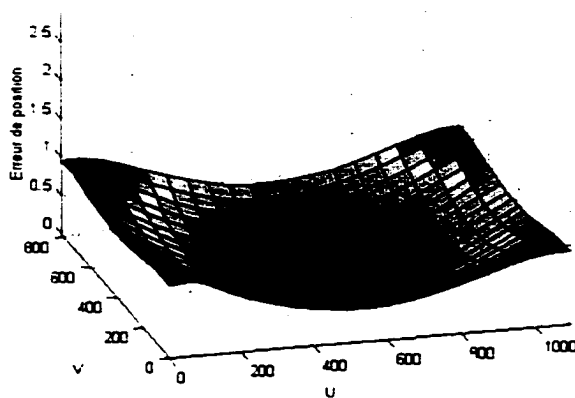


Figure 51 Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion radiale.

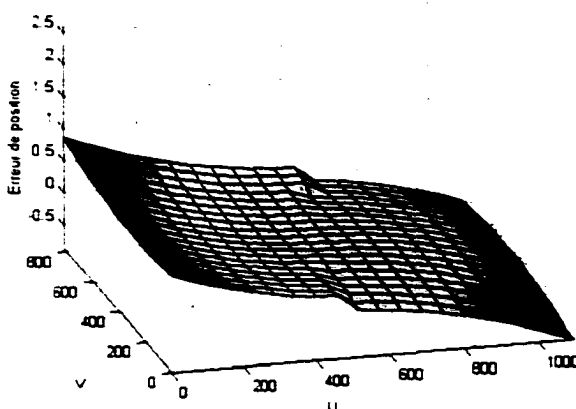


Figure 52 Vue 3D de la distribution d'intensité de la distorsion tangentielle.

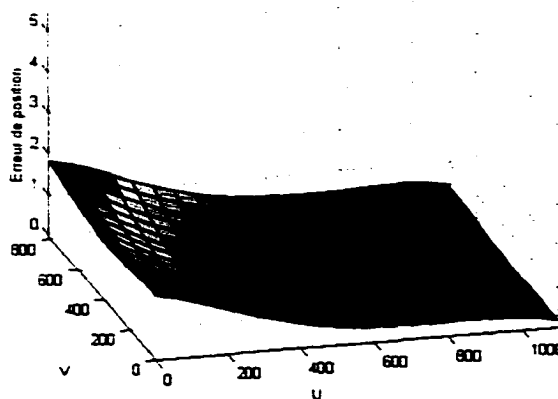


Figure 53 3D de la distribution d'intensité de la distorsion complète.

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les sources d'erreurs

Dans le but d'expliquer la performance limitée des procédures illustrées dans le présent document, il est nécessaire d'analyser les sources d'erreurs potentielles. On doit d'abord préciser que la limite de cette méthode d'application est située dans l'approximation du comportement réel du système de lentilles et de capteur de la caméra par des équations non linéaires, et la détermination de paramètres par la méthode des moindres carrés. Cette méthode admet qu'une erreur sera toujours présente, mais en minimise l'ampleur sur l'ensemble du modèle.

Advenant qu'un bruit déplace chacun des éléments utilisés en étalonnage, la nature de la distribution du mouvement de ces éléments rendra impossible la détermination de paramètres intrinsèques satisfaisant la position de l'ensemble des points. En effet, si l'on déplace chacun des points de contrôle de l'image dans une direction aléatoire, et d'une distance aléatoirement sélectionnée dans un intervalle fixe, il en résultera que la distribution d'erreur de position des pixels après la procédure d'étalonnage en sera d'autant élargie. La distribution normale de la dispersion des éléments de contrôle ne permettra pas à la procédure de compenser pour cet aspect flou, et l'écart moyen s'ajoutera à l'erreur moyenne de position des pixels à la fin de la procédure.

Bruit Gaussien, thermique et électronique

En se basant sur les règles d'émission de radiations, il est facile d'associer le bruit thermique d'un capteur de caméra au phénomène de radiation lumineuse ou électromagnétique. Ces phénomènes voient des particules être émises de façon aléatoire, dans une direction aléatoire. Le comportement de chacune des particules est impossible à prévoir, mais la distribution de leur direction suit une loi normale, ou Gaussienne. Puisque l'erreur engendrée par ce type de bruit est issu de la réception d'un électron ou

d'un photon qui ne provient pas de l'espace contenant la cible d'étalonnage, mais plutôt du capteur de caméra lui-même, il en résultera une erreur d'intensité lumineuse sur un ou plusieurs des éléments photosensibles. On peut ainsi assumer avec une certitude raisonnable que les conséquences sur la position d'un ensemble d'éléments de l'image dont la réception s'effectue dans un environnement bruité, ou dont le transfert s'effectue à l'aide d'un signal analogique entaché de bruit, suivent une distribution normale.

Algorithmes de compression

L'utilisation de l'algorithme de compression JPEG (Joint Photograph Expert Group) permet une compression substantielle de la quantité d'information à emmagasiner dans l'entreposage d'images numériques. Cette méthode de compression permet alors d'économiser un espace précieux, ou d'entreposer un plus grand nombre d'images. Il possède par contre le désavantage évident de modifier la nature de l'image compressée.

La nature exacte de la perte de qualité encourue par une image compressée par cet algorithme n'est pas dans l'objet du présent document, et il sera ainsi évité de discuter des erreurs potentiellement encourues par son utilisation dans une procédure d'étalonnage de caméra. Sans qualifier cette dégradation, il est possible de la quantifier, en utilisant une caméra qui peut restituer les images dans leur format original, ou bien compressées par un tel algorithme. La répétition de la procédure pour la même caméra permettra alors de déterminer l'influence de cette compression sur la précision atteignable dans une procédure d'étalonnage.

Poids des calculs

Approximation par la TLD

Cette procédure utilisant une relation matricielle entre deux systèmes de référence, sa solution n'est pas très lourde de calculs. Puisqu'on l'utilise uniquement dans un le but de générer une approximation de la valeur de distance focale du jeu de lentilles de la

caméra, la rigueur de son application est faible, et on trouve rapidement une solution d'une précision satisfaisante.

Solutions numériques complètes

Le processus de recherche du minimum global satisfaisant le système d'équation étant itératif, la quantité de calcul nécessaire à son application est évidemment liée directement au nombre d'itérations nécessaires dans chaque cas. Ce nombre peut varier en fonction de l'écart initial séparant la valeur de distance focale approximative de la distance focale réelle, ainsi que de la nature et de l'amplitude des éléments de distorsion. Il est donc possible que deux procédures d'étalonnage de la même caméra n'exigent pas la même quantité de calcul. Le nombre d'opérations numériques requises afin de compléter la procédure utilisée n'est donné ici qu'à titre indicatif.

Tableau X

Nombre d'opérations numériques requises par image, en extraction de points de contrôle

	8 Millions
	17 Millions

Tableau XI

Nombre d'opérations numériques requises en détermination des paramètres (par image).

	35 Millions
	45 Millions

Application de la correction d'image

Une fois les paramètres intrinsèques du système de caméra déterminés, il est possible d'appliquer une correction à chacune des images perçues ultérieurement par la même caméra. L'application de cette correction passe par un processus intense d'interpolation, qui permet de déterminer l'intensité résultante de chacun des pixels de la nouvelle image à partir des équations de distorsion du modèle. La quantité de calcul est relativement indépendante de la distorsion présente, ou des points d'application, puisque la même procédure doit être exécutée, peu importe la correction qui sera apportée. Le nombre d'opérations mentionné ici s'avère donc un bon indicatif du poids de calcul requis afin d'appliquer une correction à chacune des images perçues.

Tableau XII

Nombre d'opérations numériques requises en correction d'images (par image).

183	423	50 Millions
1152	16	150 Millions

Dérapages potentiels de la méthode

La procédure décrite dans le présent document nécessite plusieurs interventions manuelles lors de son déroulement. Ces interventions sont rendues nécessaires par les problèmes d'application des diverses étapes de la procédure. L'automatisation complète de celle-ci passe par l'élaboration d'algorithmes permettant l'extraction automatique des points de contrôle et de leur coordonnées à partir d'une image quelconque. Bien que cette automatisation ne soit pas un des objectifs du présent projet, les difficultés de son application sont ici discutées.

Identification des zones de contrôle

Bien que la cible possède une forme connue, il demeure qu'elle est composée de plusieurs objets distincts représentés par chacun des carrés. Il est toujours possible d'évaluer l'ensemble de la position de chacun des objets trouvés dans une image acquise, mais il est aussi possible que cette procédure dérape, en identifiant la position de la cible au mauvais endroit de l'image.

Cas de fortes distorsions

Il est possible de remarquer, lors de l'analyse du premier exemple d'application, que la distorsion radiale de lentilles peut atteindre des niveaux très élevés. La déformation engendrée sur l'image rend difficile la recherche automatique des points de contrôle, puisqu'une interpolation linéaire échouera certainement dans une tentative de localiser les points de contrôle situés entre les extremums de la cible. Il est possible d'effectuer manuellement plusieurs itérations en évaluant les paramètres de distorsion radiale, et en comparant le résultat de leur application avec une grille de position de recherche de points de contrôle. Cette méthode est difficilement automatisable, à moins de posséder à priori la connaissance de la position des points de contrôle dans l'image. Il serait donc nécessaire de trouver une autre méthode de recherche des points de contrôle, puisque l'application d'une distorsion préliminaire n'est possible que dans le cadre d'une évaluation qualitative et non quantitative de sa performance. Il est donc impossible de l'appliquer mathématiquement ou numériquement.

Solutions numériques et minima locaux

Le modèle utilisé dans le présent projet comporte neuf paramètres intrinsèques inconnus. Lors de la recherche d'une solution par une méthode numérique, il s'effectue une optimisation en neuf dimensions. On tente de trouver un minimum global, puisque la fonction d'optimisation représente l'erreur de position de l'ensemble des pixels de

l'image. Il est possible cependant de concevoir que l'algorithme de recherche puisse rester coincé dans un minimum local, représenté par exemple par une distance focale nulle. Il est donc important d'estimer les paramètres réels du système afin de se doter d'un point de départ qui soit le plus près possible de la solution finale. Cette approximation permet d'éviter la découverte de solutions incohérentes, ou de voir l'algorithme ne jamais converger vers une solution.

Précision et validité des résultats

Évaluation qualitative

Bien que l'on puisse à posteriori évaluer la performance de cette méthode d'étalonnage, il est important de s'intéresser à son évaluation qualitative. Il est en effet impossible d'évaluer visuellement la performance de correction d'une image qui ne soit presque pas affectée de distorsion. On doit avoir confiance que l'écart type très étroit de la distribution d'erreur de position nous donne une correction efficace.

Dans le cas d'une caméra dont les éléments optiques sont de mauvaise qualité ou comportent d'importantes déformations, la distorsion sera telle qu'il sera possible de constater aisément qu'une déformation est présente. Une fois la correction apportée, il sera donc possible d'évaluer visuellement la performance de la correction de l'image. On peut aussi utiliser un logiciel de dessin, par exemple, afin de vérifier la linéarité des éléments constituant de l'image de la cible.

Exemple de précision en application

Si l'on considère le second exemple d'application décrit plus haut, il est possible de déterminer la précision de mesure du système de caméra-lentille après avoir effectué une correction d'image appropriée. L'erreur résiduelle du modèle étant au maximum de 0.8 pixels, il est possible de projeter cette erreur en utilisant des dimensions relatives

capteur-cible, de façon à évaluer la distance couverte par une telle erreur de position. Cette évaluation permet de convertir l'erreur exprimée en pixels en une valeur métrique.

Dans le but d'éviter l'application de lourds calculs afin de déterminer les paramètres extrinsèques à partir du modèle utilisé, il est possible d'effectuer une approximation de la relation de distance entre l'image et l'espace par de simples mesures. Il est possible en effet d'utiliser les coordonnées des points limites utilisés dans le cas d'une image captée précédemment, et de comparer la valeur de distance (en pixels) avec les dimensions réelles de la cible (mesure métrique). Cette relation ne donne qu'une approximation de la précision relative du système, mais il est de toute façon impossible de déterminer une erreur de position sans connaître au préalable les dimensions de l'objet présent dans l'espace. En effet, pour chaque évaluation de l'erreur de position, il sera nécessaire de connaître les paramètres extrinsèques du système, puis calculer l'erreur de projection de l'image vers l'espace, afin d'obtenir une mesure métrique d'erreur de position.

On utilise donc les deux points :

$$p_1=(x_1,y_1)=(248,35; 189,78)$$

$$p_2=(x_2,y_2)=(823,44; 170,56)$$

Et on calcule la distance absolue :

$$d=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2} \quad (5.1)$$

$$d = 575,41 \text{ pixels}$$

La mesure correspondante de distance sur la cible est de 168.22mm.

La mesure de distance représentée par un pixel de l'image sera donc de 0.2923mm

On estime donc une erreur maximale de position sur l'image de 0.8 pixels comme une erreur de mesure d'une distance métrique de 0.234mm. Cette mesure n'est évidemment applicable que dans le cas particulier de cette image. Lorsque la cible est éloignée par exemple, la déviation métrique correspondante à la même erreur de 0.8 pixels sera plus grande.

CONCLUSION

Cette procédure d'étalonnage constitue une approche intéressante afin de déterminer les paramètres intrinsèques d'un système de caméra assorti d'un jeu de lentilles. La précision relative de la méthode cadre bien dans l'utilisation d'un système de vision afin d'effectuer un contrôle dimensionnel. La précision absolue reste à vérifier, mais il est possible de croire que l'application de cette méthode permette d'obtenir une grande précision, peu importe le niveau de distorsion présent dans le système.

Bien que la procédure soit quelque peu lourde d'application et requiert bon nombre d'interventions manuelles, elle ne doit être effectuée qu'une seule fois, d'autant que la distance focale du jeu de lentilles ne soit pas modifiée. Cette caractéristique d'application permet d'envisager la possibilité de l'utiliser dans diverses applications où l'on utilise actuellement des systèmes de solution linéaires négligeant la distorsion des lentilles.

La réussite de la procédure repose sur la bonne correspondance entre les modèles de distorsions utilisés et les effets réels de déformations des lentilles sphériques. Cette correspondance donne à la procédure la capacité d'effectuer de bonnes corrections des images prises par le système. Ces corrections sont constituées d'une série d'opérations numériques, qui quoique lourdes d'application, restent à la portée des puissants ordinateurs modernes.

ANNEXE 1

Guide d'application en programmation

GUIDE D'APPLICATION EN PROGRAMMATION

Cet annexe se veut une explication supplémentaire au présent document. Son objectif est de décrire la procédure utilisée afin de déterminer les paramètres intrinsèques du système caméra-lentilles d'un point de vue programmation.

Il fût impossible d'adjoindre au présent document un ensemble de routines de programmation, puisque l'automatisation de la procédure ne figurait pas dans les objectifs du projet. Plusieurs outils numériques et symboliques furent utilisée, rendant inutile, voir même encombrant l'utilisation de programmation.

Cet annexe se propose donc de guider le lecteur afin de lui permettre l'implantation de cette procédure sur la plate-forme de son choix.

La prise d'images

Lors de la prise d'images à des fins d'étalonnage, il est important de respecter certains critères :

- Une image ne doit pas tronquer la cible, i.e. on doit voir tous les points de contrôle.
- La cible doit couvrir la plus grande surface possible de l'image prise. Un éloignement trop grand n'a pour effet que de réduire inutilement la précision.
- L'ensemble des images doit couvrir plusieurs orientations, et plusieurs distances, de façon à éviter de biaiser l'étalonnage.

Le nombre d'images nécessaire à l'obtention d'une bonne précision est un minimum de 10 images [1].

Les extremums

L'identification, pour chacune des images, des extremums de la cible est très importante, mais très ardue. L'automatisation de cette partie de la procédure rendra probablement nécessaire l'ajout de caractéristiques supplémentaires sur les cibles utilisées, afin de déterminer aisément la position de ces points.

Une fois la position des quatre coins de la cible déterminés dans l'image, on peut interpoler la position de tous les autres de façon simple. On obtient une grille de points, et deux vecteurs de coordonnées (en u et en v).

Coordonnées exactes

Une fois déterminé la position approximative de tous ces points, on peut démarrer la recherche des coordonnées précises de ces derniers. Une boîte capable est définie autour de chacun des points, puis on utilise les transitions de tons de gris à l'intérieur de chaque boîte afin de déterminer la position exacte du croisement.

Cette procédure comporte plusieurs sous-étapes :

- Définition de la boîte capable.
- Application de l'opérateur Laplacien à l'intérieur de la boîte.
- Balayage horizontal et vertical afin de constituer une banque de points appartenant à la ligne de transition.
- Formation d'une équation locale de ligne horizontale et verticale.
- Détermination de l'intersection de ces deux lignes avec une précision plus grande que la résolution de l'image.

On obtient donc deux nouveaux vecteurs de coordonnées des points de contrôle expérimentaux, d'une précision acceptable.

La solution

Afin de trouver une solution au problème des modifications encourues par l'image lors du passage des rayons lumineux dans les lentilles, on doit créer une correspondance entre l'univers et l'image observée expérimentalement (les images captées précédemment).

La correspondance s'effectuera entre deux images, soit l'image expérimentale dont on possède les coordonnées des points de contrôle, et une image virtuelle, de laquelle on devra déterminer la position des points de contrôle.

L'image virtuelle ci-mentionnée proviendra donc d'une cible virtuelle, dont la position est encore inconnue. La cible possède des dimensions connues, et il est donc possible de créer une correspondance entre cette cible placée à un endroit quelconque de l'univers, et l'image virtuelle engendrée par l'application de la projection et des distorsions.

La cible placée à un endroit quelconque devra donc subir trois transformations principales, soit une translation T , pour la déplacer dans le référentiel de la caméra, puis une rotation R . Une projection est ensuite effectuée avec la distance focale f appliquée comme facteur d'agrandissement ou de rétrécissement relatif.

On obtiendra donc une image encore parfaite, mais située dans le référentiel de la caméra. On peut ensuite utiliser les formules de distorsion radiale et tangentielle afin d'appliquer une déformation à chacun des points de contrôle en fonction de sa position par rapport au point d'application de ces distorsions.

L'image résultante est virtuelle, et on la compare à l'image obtenue expérimentalement afin de déterminer l'erreur globale de position des points de contrôle par la méthode des moindres carrés.

Chaque image est en réalité constituée d'une grille de points possédant des coordonnées (u,v) . On aura donc une erreur de position des points entre les deux images représentée par:

$$E = \sum_{i=1}^n \left[(\tilde{u}_i - u_i)^2 + (\tilde{v}_i - v_i)^2 \right] \quad (A1)$$

tel que (u,v) représente les coordonnées expérimentales et (\tilde{u},\tilde{v}) représente les coordonnées virtuelles pour chaque point de contrôle. Ces points de contrôle sont au nombre de i ($i=169$ dans le cas d'une cible 13×13).

On possède déjà l'ensemble des coordonnées expérimentales, et on peut déterminer les coordonnées virtuelles à partir des coordonnées suivantes:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial u^{(r)} \\ \partial v^{(r)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial u^{(t)} \\ \partial v^{(t)} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

Où (u_p, v_p) représente les coordonnées des points après leur projection dans le référentiel de la caméra, et les deux paramètres de distorsion radiale et tangentielle sont appliqués à partir d'un point central (u_0, v_0) :

$$\begin{bmatrix} \delta u^{(r)} \\ \delta v^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_p (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) \\ v_p (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$\begin{bmatrix} \delta u^{(r)} \\ \delta v^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2k_4 u_p v_p + k_5 (r_i^2 + 2u_p^2) \\ k_4 (r_i^2 + 2v_p^2) + 2k_5 u_p v_p \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

Et où le rayon r_i représente la distance séparant le point (u_p, v_p) du point central d'application (u_0, v_0) :

$$r_i = \sqrt{(u_p - u_0)^2 + (v_p - v_0)^2} \quad (\text{A5})$$

Les coordonnées (u_p, v_p) sont issues de la projection suivante:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \end{bmatrix} = \underset{\sim p}{f} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

Et les coordonnées $(x_p, y_p, \underset{\sim}{z}_p)$ sont issues des transformations suivantes:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \underset{\sim}{z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \underset{\sim}{z}_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A7})$$

Tel que:

$$m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa \quad (\text{A8})$$

$$m_{12} = \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa - \cos \omega \sin \kappa \quad (\text{A9})$$

$$m_{13} = \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \quad (\text{A10})$$

$$m_{21} = \cos \varphi \sin \kappa \quad (\text{A11})$$

$$m_{32} = \sin \omega \cos \varphi \quad (\text{A12})$$

$$m_{31} = -\sin \varphi \quad (\text{A13})$$

$$m_{22} = \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \quad (\text{A14})$$

$$m_{23} = \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \sin \kappa \quad (\text{A15})$$

$$m_{33} = \cos \omega \cos \varphi \quad (\text{A16})$$

et T représente la translation nécessaire afin de rapporter l'image du point dans le référentiel de la caméra:

$$T = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A17})$$

La procédure vise à placer un plan de cible contenant tous les points de contrôle à l'origine du référentiel de la caméra. On applique ensuite les transformations T et R , de façon à positionner cette cible virtuelle dans l'univers. L'objectif est évidemment de placer cette cible au même endroit que celle utilisée lors de la prise d'image expérimentale.

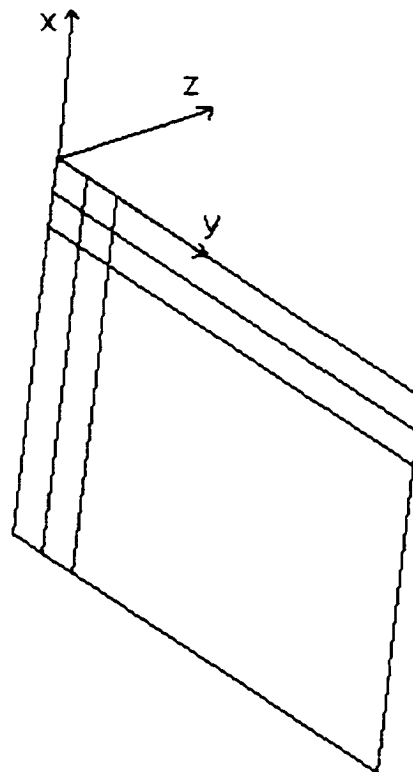


Figure 54 Construction du plan de points

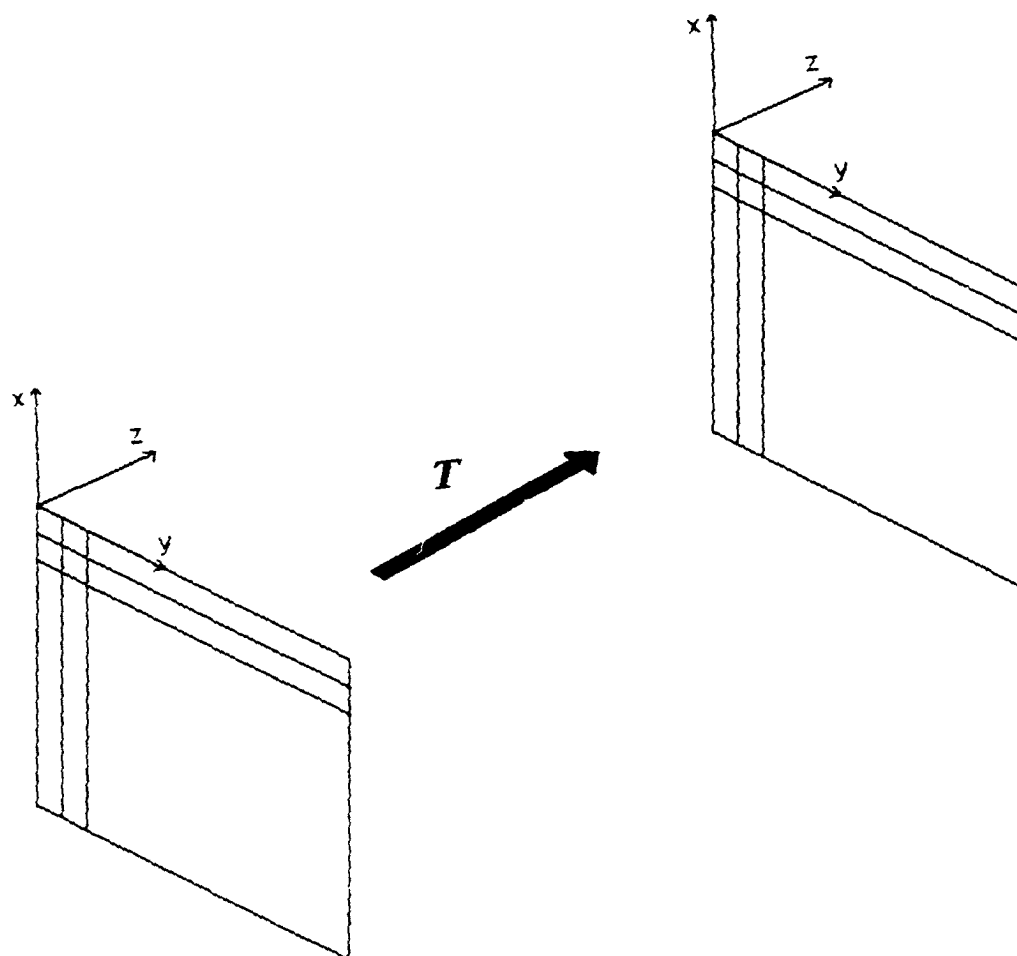


Figure 55 Application de la translation

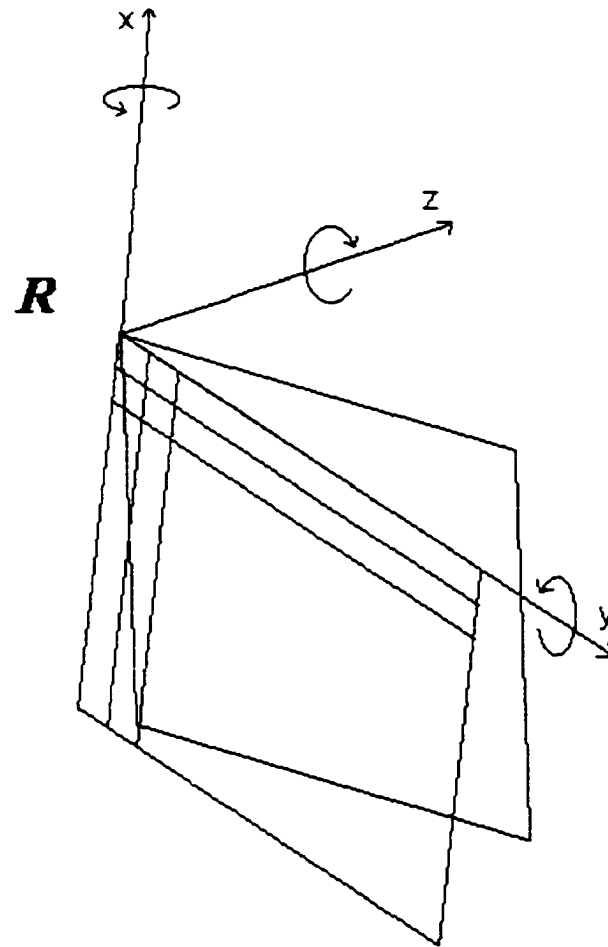


Figure 56 Application de la rotation

Une fois ces transformations effectuées, la cible est projetée sur un plan, situé à l'origine du référentiel de la caméra. Cette projection inclut la distance focale, servant de facteur

d'échelle et permettant d'établir un rapport entre la grandeur des objets et leur distance relative au capteur.

La projection permet d'obtenir une image virtuelle. Cette image est issue simplement d'une projection d'une cible virtuelle, dont on estime les paramètres extrinsèques.

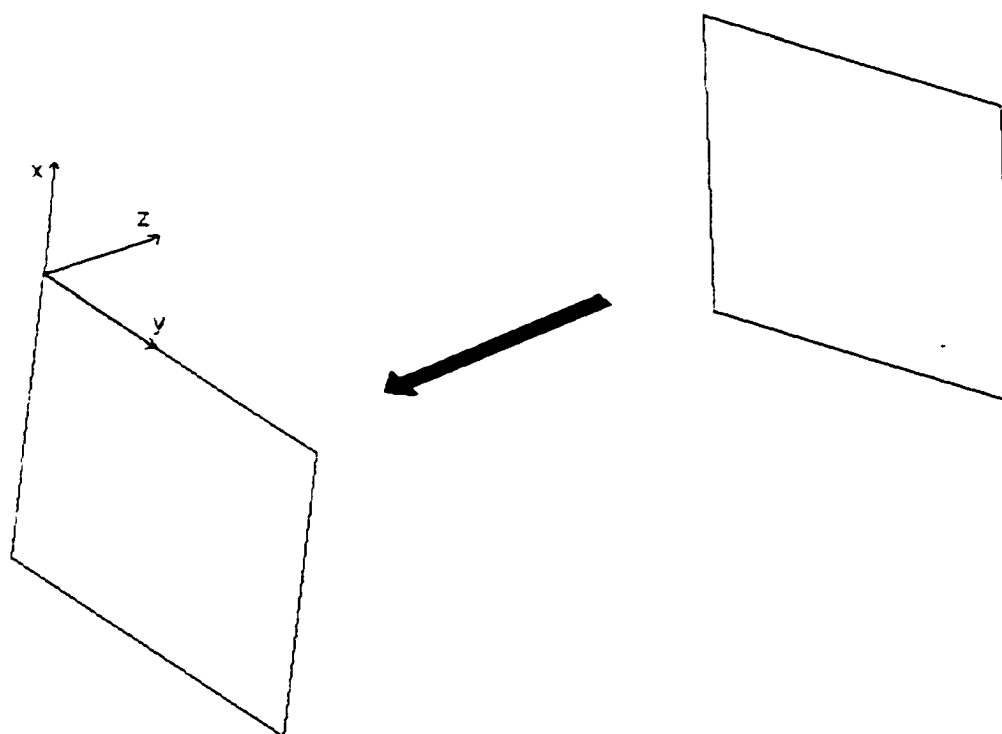


Figure 57 Projection de la cible virtuelle sur le capteur

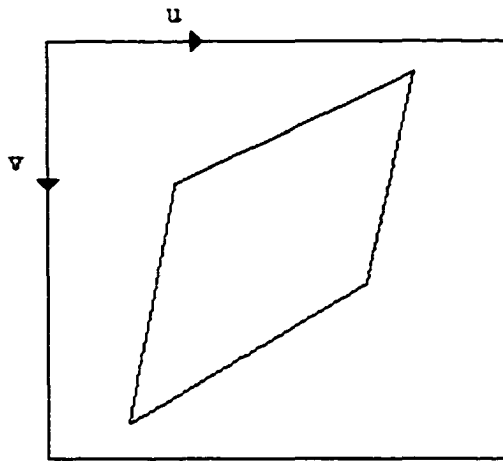


Figure 58 Image virtuelle obtenue

Les paramètres libres:

On tente donc de déterminer les paramètres intrinsèques et extrinsèques du système en même temps. Il est par contre important de mentionner que les paramètres intrinsèques seront les mêmes pour l'ensemble des images captées, tandis que les paramètres extrinsèques seront différents d'une image à l'autre. Les égalités devront être planifiées soigneusement lors de la programmation.

Pour chaque itération, il est nécessaire de constituer un plan représentant la cible dans l'univers. Ce plan contiendra donc l'ensemble des points de contrôle. La position des points de contrôle peut donc être déterminée par l'application de deux matrices R et T à partir du référentiel de la caméra.

La position des points de contrôle est initialement extrapolée à partir de la position du centre de l'image ou un de ses coins, au choix de l'utilisateur.

À chaque point initial correspond donc un nouveau point dans l'univers après les transformations. Chacun de ces points sera ensuite projeté dans le référentiel de la caméra, et on obtiendra ainsi une nouvelle image virtuelle.

La solution

Afin de déterminer un équilibre entre les paramètres extrinsèques et intrinsèques, il est nécessaire d'utiliser un algorithme de recherche numérique. Ce dernier devra déterminer un minima global qui satisfasse l'ensemble des paramètres. Une seule position de cible dans l'univers, combinée à une distance focale et des paramètres de distorsions satisfera les coordonnées expérimentales obtenues lors de la prise d'image.

Il est important, lors de la recherche de solution, d'utiliser un seul ensemble de paramètres intrinsèques $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, f_x, f_y, u_0, v_0)$, mais de diviser les paramètres extrinsèques $(\omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0)$ en autant de matrices qu'il y a d'images à traiter. On trouvera un seul ensemble de paramètres intrinsèques à la solution, mais plusieurs ensembles de paramètres extrinsèques. Ces derniers ne nous intéressent pas dans le but d'étalonner la caméra, mais uniquement dans le but de déterminer avec précision les paramètres intrinsèques.

On cherche donc les valeurs de position des points virtuels à partir de la grille initiale de points en utilisant les paramètres $(m_{11} \dots m_{33})$ de la matrice \mathbf{R} , ainsi que la translation de la matrice \mathbf{T} :

$$x_p = (m_{11}X_p + m_{12}Y_p + m_{13}Z_p) + x_0 \quad (\text{A18})$$

$$y_p = (m_{21}X_p + m_{22}Y_p + m_{23}Z_p) + y_0 \quad (\text{A19})$$

$$z_p = (m_{31}X_p + m_{32}Y_p + m_{33}Z_p) + z_0 \quad (\text{A20})$$

On aura donc des coordonnées de projection sur le plan du capteur de la caméra :

$$u = \frac{f_u \cdot x_p}{z_p} \quad (\text{A21})$$

$$v = \frac{f_v \cdot y_p}{z_p} \quad (\text{A22})$$

En combinant les équations (18),(19) et (20) aux équation (21) et (22), on obtient :

$$u = \frac{f_u [(m_{11}X_p + m_{12}Y_p + m_{13}Z_p) + x_0]}{(m_{31}X_p + m_{32}Y_p + m_{33}Z_p) + z_0} \quad (\text{A23})$$

$$v = \frac{f_v [(m_{21}X_p + m_{22}Y_p + m_{23}Z_p) + y_0]}{(m_{31}X_p + m_{32}Y_p + m_{33}Z_p) + z_0} \quad (\text{A24})$$

Puis en ajoutant les distorsions :

$$u = \frac{f_u [(m_{11}X_p + m_{12}Y_p + m_{13}Z_p) + x_0]}{(m_{31}X_p + m_{32}Y_p + m_{33}Z_p) + z_0} \quad (A25)$$

$$+ u (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) + 2k_4 u v + k_5 (r_i^2 + 2u^2)$$

$$v = \frac{f_v [(m_{21}X_p + m_{22}Y_p + m_{23}Z_p) + y_0]}{(m_{31}X_p + m_{32}Y_p + m_{33}Z_p) + z_0} \quad (A26)$$

$$+ v (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6 + \dots) + k_4 (r_i^2 + 2v^2) + 2k_5 u v$$

Tel que :

$$r_i = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \quad (A27)$$

Puis l'on modélise la fonction objectif de la recherche, c'est à dire l'erreur de position de l'ensemble des points virtuels par rapport aux points expérimentaux, et ce au sens des moindres carrés :

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n [(u_e - u)^2 + (v_e - v)^2] \quad (A28)$$

n représentant le nombre de points de contrôle, (u_e, v_e) représentant les valeurs de position des points de contrôle expérimentaux, et (u, v) représentant les coordonnées virtuelles que l'on cherche à générer.

L'algorithme

Afin de permettre la recherche numérique de la solution, il est nécessaire d'obtenir les dérivées partielles pour chacune des variables libres dont nous recherchons la valeur, soit l'ensemble $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0, f_x, f_y, u_0, v_0]$.

La taille des équations engendrées est telle que nous avons choisi d'omettre leur publication ici. L'utilisation d'un logiciel symbolique tel que Maple ® est toute indiquée afin de générer les équations de dérivée partielle pour chacune des variables libres. Cette procédure vise évidemment à les implanter dans un programme, écrit en C++ par exemple.

L'algorithme particulier de recherche est un libre choix de l'utilisateur. Des méthodes telles que Levenberg-Maquardt ou Nelder-Mead convergent de façon satisfaisante.

Considérations des valeurs de départ

La complexité évidente de ce système de recherche de solution nous permet d'envisager que la recherche numérique pourrait se retrouver dans un minima local, ou encore de dépasser certaines valeurs cohérentes. Le choix judicieux des valeurs de départ est donc très important, ainsi que la création de bornes de recherche qui éviterons de se retrouver, par exemple, avec une distance focale négative.

On peut démarrer l'algorithme avec des paramètres de distorsion nuls, simulant ainsi une lentille parfaite ($k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=0$). Le point d'application des distorsions (u_0, v_0) sera localisé au centre de l'image.

Les autres paramètres, soit les matrices R et T , ainsi que la distance focale, se verront assignés une valeur approximative, issue de leur évaluation par une autre méthode, telle que les points disparaissants ou « vanishing points ». Cette méthode utilise simplement les quatre coins de la cible perçue dans la prise d'image expérimentale, et reconstruit le plan qui la contient. Une fois ce plan établi, on évalue le rapport entre les distances focales et la taille de la cible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Heikkilä, J., Silvén, O. (1996). *Calibration procedure for short focal length off-the-shelf CCD cameras*. Proc. 13th International Conference on Pattern Recognition. Vienna, Austria, p. 166-170
- [2] Bouguet, J. Y. (1999). *Visual methods for three-dimensional modeling*. Dr. Ing thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, p. 30-52.
- [3] Melen, T. (1994). *Geometrical modeling and calibration of video cameras for underwater navigation*. Dr. ing thesis, Norges tekniske høyskole. Institutt for teknisk kybernetikk.
- [4] Li, J.C., Schenk, T. (1990). *An accurate camera for the aerial image analysis*. Proc. IEEE International Conference on Pattern Recognition, p. 207-209
- [5] Fan, H., Yuan, B.Z. (1991). *An accurate and practical camera calibration system for 3-D computer vision*. Chinese Journal of Electronics (English version), Vol.1, No.1, p. 63-71
- [6] Tsai, R.Y. (1986). *An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision*. Proc. IEEE International Conference CVPR, p. 364-374
- [7] Li, J., Yuan, B. (1990). *An accurate camera calibration algorithm for stereo vision*. Chinese Journal of Computer (English version), Vol.13, No.3, p. 194-201

- [8] Fan, H., Yuan, B. (1993). *High Performance Camera Calibration Algorithm*. Proc. The International Society for Optical Engineering. Boston, Massachusetts, Vol. 2067, 2-20.
- [9] Marion. André (1987). *Introduction aux techniques de traitement d'images*. Eyrolles, p.241-249
- [10] Jain, R., Rangachar, K., Schunk, B.G. (1995). *Machine Vision*. McGraw Hill, p. 168-173
- [11] Jain, R., Rangachar, K., Schunk, B.G. (1995). *Machine Vision*. McGraw Hill, p. 174-178
- [12] Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M. (1971). *Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry*. Proc. Symposium on Close-Range Photogrammetry. Urbana, Illinois, p. 1-18.
- [13] Nelder, J. A., R. Mead, *A Simplex Method for Function Minimization*. Computer Journal, Vol. 7, p. 308-313
- [14] Hewlett Packard (2002). *HP2200 series LaserJet Technical Specifications*, Hewlett Packard.